



**Luís Filipe Rodrigues
de Sousa**

**Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento
Térmico de Edifícios**



**Luís Filipe Rodrigues
de Sousa**

**Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento
Térmico de Edifícios**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha família.

o júri

presidente

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em poucas palavras, o meu infindável agradecimento

Ao meu orientador, Prof. Nelson Martins, pela confiança, apoio e pelas sábias palavras que conduziram este trabalho.

Ao Pedro Carvalho, pela disponibilidade e colaboração na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Lúcia e Luís, sem o seu sacrifício e infindável apoio certamente não estaria aqui.

Aos meus irmãos, Carolina e Pedro, por suportarem todos estes anos a minha ausência.

Aos meus amigos, pelas palavras de incentivo, e sobretudo, pelos momentos que passamos e que seguramente iremos passar.

palavras-chave

termografia passiva, imagem térmica, isolamento térmico, ensaios não destrutivos, envolvente de edifícios, coeficiente de transmissão térmica

resumo

Ao longo dos últimos anos tem vindo a ocorrer uma profunda alteração das regras, conceitos e exigências a satisfazer no domínio da construção de edifícios. Perdas ou ganhos de calor descontrolados através da envolvente dos edifícios já não são aceitáveis actualmente.

A termografia por infravermelhos apresenta-se como uma técnica emergente e promissora, do tipo não destrutivo, para a caracterização das propriedades associadas ao comportamento térmico da envolvente de edifícios a partir da análise de padrões de distribuição de temperatura superficial. No entanto, a análise automática de imagens captadas na gama dos infravermelhos é uma área ainda embrionária.

O principal objectivo deste trabalho passou pelo desenvolvimento de técnicas de análise e diagnóstico de imagens obtidas recorrendo à técnica acima referida, permitindo a um utilizador menos experiente, identificar patologias e ineficiências dos edifícios analisados.

A captação da imagem térmica e o pré-tratamento dos dados realizou-se com recurso ao programa do equipamento de termografia (NEC/AVIO® - TH9100MLN), ao passo que o desenvolvimento dos módulos de tratamento de imagem, identificação de zonas e análise de temperaturas foi realizado recorrendo ao programa MatLab®.

Duas abordagens distintas foram estabelecidas; a primeira, onde é feita a análise da imagem térmica com recurso a variadas técnicas de processamento de imagem e a subsequente detecção de zonas através das diferenças de cor existentes; e a segunda, onde se abordou apenas a matriz de temperatura superficial de modo a encontrar as diversas zonas de interesse e respectivas propriedades (área, temperatura superficial média e emissividade).

Foi desenvolvida uma análise meramente indicativa da relação entre os vários valores do coeficiente de transmissão térmica - U, detectados numa fachada tendo por base as diferenças de temperatura superficial obtidas por termografia.

As ferramentas e procedimentos desenvolvidos foram testados e validados em dois edifícios do campus da Universidade de Aveiro, uma residência universitária e um edifício com salas de aula.

keywords

passive infrared thermography, thermal image, thermal insulation, nondestructive evaluation, building envelope, U-value

abstract

A profound change on design rules and requirements in the building construction sector namely regarding energy demand and indoor air quality has occurred as a result of the EPBD directive. Uncontrolled heat losses and gains through building envelope are no longer accepted.

Passive infrared thermography is an emerging and promising nondestructive evaluation technique to recognize the thermal behavior of building envelope by analyzing thermal patterns on surface temperature. However, automated analysis of thermal images is an unexplored field.

The main goal of this work was to develop thermal images analysis techniques to detect and identify building defects and anomalies even by an inexperienced user.

For the purpose of this work, image acquisition and pre-processing was done with the IR-thermography camera TH9100MLN™ manufacture by NEC/AVIO™ and respective software. Thermal image treatment, analysis and pattern recognition applications were developed with Matlab™ software.

Two different approaches were established; on the first one, thermal image analysis is performed by image processing techniques and thermal patterns are detected by color image segmentation; on the second one, surface temperature data are analyzed in order to find the different areas of interest and their properties (surface area, average surface temperature and emissivity).

Based on surface temperatures obtained by infrared thermography, the relationship between different U-values was assessed through a simple approach.

In order to validate the applications developed in this work, tests were carried out on two buildings at Universidade de Aveiro campus, a classroom building and a student dormitory.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objectivo e contribuição da dissertação.....	1
1.3.	Estrutura da dissertação	2
2.	Fundamentos teóricos	5
2.1.	Termografia e equipamentos.....	5
2.1.1.	Radiação infravermelha	5
2.1.2.	Termografia por infravermelhos	6
2.1.2.1.	Equipamentos.....	6
2.1.2.2.	Termografia qualitativa e quantitativa.....	12
2.1.2.3.	Termografia activa e passiva	13
2.1.2.4.	Vantagens e limitações da termografia.....	14
2.1.2.5.	Aplicações da termografia.....	16
2.2.	Transferência de Calor	26
2.2.1.	Radiação	27
2.2.1.1.	Corpo negro.....	27
2.2.1.2.	Superfície real.....	28
2.2.1.3.	Emissividade	28
2.2.1.4.	Radiação em corpos reais.....	30
2.2.2.	Resistência térmica	32
2.2.2.1.	Condução.....	32
2.2.2.2.	Convecção	33
2.2.3.	Coeficiente de transmissão térmica.....	36
3.	Revisão bibliográfica	37
3.1.	Interpretação de Imagens Termográficas	37
3.1.1.	Captação de Imagens Termográficas	37
3.1.2.	Reconhecimento de Imagem	39
3.1.3.	Tratamento e Análise de Informação.....	40
3.2.	Termografia e Edifícios.....	42
3.3.	Isolamento Térmico	45
3.4.	Detecção e quantificação de pontes térmicas	47

3.5.	Identificação de Anomalias	48
3.6.	Determinação do coeficiente de transmissão térmica	49
4.	Sistema Integrado de captação, interpretação e análise de Imagens Termográficas	51
4.1.	Enquadramento com o modelo matemático	51
4.2.	Principais Componentes.....	52
4.2.1.	Área real do pixel	53
4.2.2.	Influência da definição incorrecta da emissividade	54
4.3.	Módulo de Análise de Imagem	55
4.3.1.	Construção da matriz das temperaturas com base na imagem digital.....	58
4.4.	Módulo de Tratamento de Temperaturas	60
4.4.1.	Estimativa do fluxo de calor	68
4.4.2.	Cálculo da relação entre valores de U.....	68
5.	Caso de estudo	73
5.1.	Parte 1 – Abordagem imagem digital.....	74
5.1.1.	Caso 1	74
5.1.2.	Caso 2	77
5.2.	Parte 2 – Abordagem matriz temperaturas	80
5.2.1.	Caso 1	80
5.2.2.	Caso 2	83
6.	Conclusão e trabalhos futuros	89
6.1.	Conclusões.....	89
6.2.	Trabalhos futuros	90
	Referências bibliográficas	93
	Anexo A	99
	A. Valores de emissividade	99
	Anexo B	101
	B. Ensaio experimental para verificação da área do pixel.....	101

Índice de figuras

Figura 2.1 – Espectro electromagnético parcial.....	5
Figura 2.2 – Transmissão da radiação infravermelha na atmosfera	6
Figura 2.3 – Câmara termográfica.....	7
Figura 2.4 - Curvas de transmissão dos materiais mais utilizados em lentes	8
Figura 2.5 – Microbolómetro	8
Figura 2.6 - Modelos de câmaras de infravermelhos.....	10
Figura 2.7 – Técnicas mais comuns em termografia	13
Figura 2.8 - Imagens térmicas espaciais captadas pelo IRAS	16
Figura 2.9 - Avaliação de caldeiras através de imagens térmicas	16
Figura 2.10 - Avaliação de fornos industriais através da termografia	17
Figura 2.11 - Placa de gesso com inclusão metálica	17
Figura 2.12 - Aplicações da termografia em edifícios	18
Figura 2.13 - Termografia aplicada à aeronáutica	18
Figura 2.14 - Termografia aplicada à indústria automóvel	19
Figura 2.15 - Imagens térmicas de circuitos eléctricos	19
Figura 2.16 – Imagens térmicas de sistemas eléctricos	20
Figura 2.17 - Termografia aplicada na manutenção de sistemas mecânicos	21
Figura 2.18 - Verificação de nível de um reservatório	21
Figura 2.19 - Verificação térmica de linhas de alimentação de tanques	22
Figura 2.20 - Imagem térmica do processo de laminagem de aço	22
Figura 2.21 – Recipiente para transporte de combustível nuclear.....	22
Figura 2.22 - Imagens térmicas de veículos militares	23
Figura 2.23 - Imagem térmica de uma mina terrestre	23
Figura 2.24 – Imagens térmicas de aplicações em medicina	24
Figura 2.25 - Aplicação da termografia em aeroportos para despiste de doenças	24
Figura 2.26 - Termografia aplicada ao estudo de doenças em animais.....	25
Figura 2.27 – Termografia em aplicações veterinárias	25
Figura 2.28 - Termografia aplicada ao estudo vulcânico	25
Figura 2.29 - Espectro electromagnético	27
Figura 2.30 – Ilustração da Lei de <i>Planck</i>	28
Figura 2.31 - Emissividade de um corpo negro e de uma superfície real	29
Figura 2.32 - Balanço de energia radiante para um corpo real.....	30
Figura 2.33 -Transferência de calor por radiação	31
Figura 2.34 - Condução de calor através de uma parede plana.....	32
Figura 2.35 - Condutividade térmica de alguns materiais.....	33
Figura 2.36 – Transferência de calor por convecção.....	34
Figura 3.1 - Intervalos de captação de radiação infravermelha.....	38
Figura 3.2 - Resolução da imagem térmica e área captada	39
Figura 3.3 – Sistema RGB e HSV	39
Figura 3.4 – Perdas pela envolvente em habitações.....	43

Figura 3.5 - Imagem térmica de uma habitação	43
Figura 3.6 – Aplicação da irradiação solar no estudo do isolamento térmico	46
Figura 3.7 – Ponte térmica plana – pilar/viga	48
Figura 3.8 – Parede e cobertura com humidade.....	49
Figura 4.1 – Diagrama geral de um ensaio termográfico.....	51
Figura 4.2 – Diagrama da metodologia desenvolvida	53
Figura 4.3 - Diagrama do módulo de análise da imagem digital.....	55
Figura 4.4 – Tratamento da imagem térmica.....	56
Figura 4.5 – Análise da imagem térmica	57
Figura 4.6 – Caracterização das zonas encontradas	58
Figura 4.7 – Identificação das zonas na imagem térmica	58
Figura 4.8 – Imagem digital a cores e imagem construída no módulo em <i>Matlab</i> ®	60
Figura 4.9 – Painel inicial do módulo de temperaturas - TIV	60
Figura 4.10 - Diagrama do módulo de tratamento de temperaturas	61
Figura 4.11 – Importação do ficheiro de temperaturas para o TIV.....	61
Figura 4.12 – Mapas de cor disponíveis em imagens digitais	62
Figura 4.13 – Imagem 2D, Contorno Isotérmicas e 3D construída na aplicação TIV	62
Figura 4.14 – Mensagem de detecção de temperaturas negativas	63
Figura 4.15 – Representação com temperaturas negativas sem correcção e com correcção	63
Figura 4.16 – Introdução da emissividade, distância e temperatura ambiente no TIV	64
Figura 4.17 – Painel propriedades.....	64
Figura 4.18 – Painel temperaturas	65
Figura 4.19 – Detecção por manipulação dos intervalos de temperatura.....	65
Figura 4.20 – Detecção de objectos por selecção de área.....	66
Figura 4.21 – Objectos removidos da envolvente.....	66
Figura 4.22 – Painel número de intervalos	66
Figura 4.23 – Análise da envolvente	67
Figura 4.24 – Correcção da temperatura pela emissividade.....	67
Figura 4.25 – Relação entre o U_i e U_{ref}	70
Figura 4.26 – Apresentação dos resultados da análise	71
Figura 4.27 – Exportação dos resultados para ficheiro.....	71
Figura 5.1 – Imagem térmica no programa de visualização da câmara <i>NEC/AVIO</i> ®	73
Figura 5.2 – Imagens térmicas em formato <i>RGB</i> (caso 1 e 2)	74
Figura 5.3 – Tratamento da imagem térmica (caso 1)	74
Figura 5.4 – Análise da imagem térmica (caso 1).....	75
Figura 5.5 – Caracterização das zonas encontradas (caso 1)	75
Figura 5.6 – Identificação das zonas na imagem térmica (caso 1).....	76
Figura 5.7 – Pré-processamento da imagem térmica (caso 2).....	77
Figura 5.8 – Análise da imagem térmica (caso 2).....	77
Figura 5.9 – Caracterização das zonas encontradas (caso 2)	78
Figura 5.10 – Identificação das zonas na imagem térmica (caso 2).....	78
Figura 5.11 – Imagem térmica e visível (caso1)	80

Figura 5.12 – Imagem térmica construída no programa TIV (caso 1)	80
Figura 5.13 – Remoção de vários objectos (caso 1)	81
Figura 5.14 – Objectos removidos da imagem térmica (caso 1)	81
Figura 5.15 – Zonas identificadas como envolvente (caso 1)	82
Figura 5.16 – Zonas com maior área, zonas 3 e 4 (caso 1).....	82
Figura 5.17 – Relação U/U_{ref} (caso 1).....	83
Figura 5.18 – Imagem térmica e visível (caso 2)	84
Figura 5.19 – Imagem térmica construída no programa TIV (caso 2)	84
Figura 5.20 – Remoção dos vãos envidraçados (caso 2)	85
Figura 5.21 – Zonas identificadas como envolvente (caso 2)	86
Figura 5.22 – Zonas com maior área, zonas 3 e 4 (caso 2).....	86
Figura 5.23 – Relação U/U_{ref} (caso 2)	87

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Sub-regiões da radiação infravermelha	5
Quadro 2.2 - Escolha do comprimento de onda da câmara termográfica.....	11
Quadro 2.3 - Gama temperaturas e resolução de alguns equipamentos.....	11
Quadro 2.4 – Vantagens e limitações da termografia por infravermelhos	15
Quadro 2.5 - Emissividade de alguns materiais a 0°C	29
Quadro 2.6 – Valores típicos do coeficiente de convecção	35
Quadro 3.1 – Valores de h aplicados à envolvente de edifícios	50
Quadro 4.1 – Intervalos propostos para definição de regiões de cores	57
Quadro 5.1 – Resultados da análise da imagem (caso 1).....	76
Quadro 5.2 – Resultados da análise da imagem (caso 2).....	79
Quadro 5.3 – Resultados da selecção de vários objectos (caso 1).....	81
Quadro 5.4 – Intervalos de temperatura para a identificação das zonas (caso 1)	82
Quadro 5.5 – Resultados da identificação das zonas (caso 1)	83
Quadro 5.6 – Resultados da selecção dos vãos envidraçados (caso 2).....	85
Quadro 5.7 – Intervalos de temperatura para a identificação das zonas (caso 2)	85
Quadro 5.8 – Resultados da identificação das zonas (caso 2)	87

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Actualmente, passamos a maior parte do nosso tempo em edifícios, logo a maior fasquia do consumo de energia é para garantir o conforto dos seus ocupantes. Assim sendo, o aumento da eficiência no consumo energético e a aplicação de medidas que visam racionalização de energia contribuem para uma melhoria económica, social e ambiental do país.

Ao longo dos últimos anos tem vindo a ocorrer uma profunda alteração das regras, conceitos e exigências a satisfazer no domínio da construção. As perdas ou ganhos de calor descontrolados através da envolvente dos edifícios já não são aceitáveis actualmente. Esta era uma situação que originava um consumo excessivo de energia, que além de aumentar a factura energética contribuía também para o aumento das emissões de CO₂, prejudicando o desempenho energético global do País.

As novas regulamentações energéticas lançadas a nível nacional e europeu vieram reforçar a implementação de um dimensionamento cuidado da envolvente de forma a garantir o conforto higrotérmico e uma durabilidade aceitável dos seus componentes, impondo requisitos mínimos no comportamento da envolvente através da emissão de um certificado energético que veio comprovar a qualidade e performance energética da habitação.

A termografia por infravermelhos apresenta-se como uma técnica emergente e promissora, do tipo não destrutivo, para a caracterização das propriedades associadas ao comportamento térmico de fachadas de edifícios a partir da análise de padrões de distribuição de temperatura superficial. Apesar deste pressuposto, a análise automática de imagens captadas na gama dos infravermelhos é uma área ainda embrionária.

A termografia aplicada ao estudo da envolvente de edifícios contribui para a detecção de falhas no isolamento e identificação de zonas onde serão necessárias correcções, tanto a nível da falta de isolamento ou a necessidade de aplicar camadas adicionais, como ao nível da identificação de zonas onde o isolamento térmico aplicado nada contribui para a eficiência energética, sendo considerado um desperdício de material, e podendo mesmo prejudicar o comportamento térmico da envolvente.

1.2. Objectivo e contribuição da dissertação

O objectivo deste trabalho passa por estudar de que modo a termografia por infravermelhos poderá contribuir para caracterização das propriedades associadas ao comportamento térmico da envolvente de edifícios a partir da análise de padrões de distribuição de temperatura superficial.

Pretende-se ainda desenvolver uma ferramenta capaz de proceder à análise e diagnóstico de imagens térmicas obtidas recorrendo à termografia passiva, e permitir a um utilizador menos

experiente, identificar patologias e ineficiências dos edifícios analisados, e finalmente extrair os dados necessários para a aplicação do método desenvolvido por Branco [2008], onde é utilizado um modelo matemático, baseado em metodologias inversas, para a determinação do coeficiente global de condução de calor em edifícios com base no conhecimento das temperaturas superficiais.

Por fim, tendo em conta que o U é um importante parâmetro na Certificação Energética de Edifícios, resolveu-se desenvolver uma abordagem cujo resultado é meramente indicativo da relação entre os vários valores de U detectados numa fachada tendo por base as diferenças de temperaturas encontradas. Futuramente, esta metodologia conjugada com a aplicação de um método não invasivo de determinação do U , como por exemplo com um fluxímetro na zona escolhida como referência, resulte na caracterização térmica de toda fachada do edifício.

1.3.Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se estruturalmente dividido em seis capítulos.

No capítulo 1, é feita uma nota introdutória à temática abordada onde se destaca a relevância e modernidade do tema, são descritos os objectivos principais e as linhas directrizes que guiaram este trabalho para a esperada contribuição da dissertação para o tema.

Os fundamentos teóricos que regem este trabalho são descritos no capítulo 2, onde consta toda a informação relativa à termografia por infravermelhos e são expostos os princípios dos fenómenos de transferência de calor em edifícios.

Já no capítulo 3, enquadrrou-se o presente trabalho no contexto de investigações precedentes, destacando-se a informação relativa à imagem térmica e a aplicação da termografia nos edifícios. Embora este capítulo reúna toda a pesquisa bibliográfica relevante para o tema, ao longo de toda a dissertação são efectuadas revisões locais sempre que for necessário.

Por sua vez, no capítulo 4, é apresentado o Sistema Integrado de captação, interpretação e análise de Imagens Termográficas que engloba os módulos desenvolvidos no programa MatLab® de acordo com as duas abordagens criadas especificamente no âmbito deste trabalho. A primeira, onde é feita a análise da imagem térmica com recurso a variadas técnicas de processamento de imagem e a subsequente detecção de zonas através das diferenças de cor existentes; e a segunda, onde se abordou apenas a matriz de temperatura superficial de modo a identificar as diversas zonas de interesse. Este último módulo, além de proceder à análise e diagnóstico de imagens térmicas obtidas recorrendo à termografia passiva, foi desenvolvido de modo a permitir a identificação de patologias e ineficiências nos edifícios analisados por um utilizador menos experiente. Esta ferramenta permite ainda realizar uma análise meramente indicativa da relação entre os vários valores do coeficiente de transmissão térmica - U , identificados de acordo com as zonas detectadas tendo por base as diferenças de temperatura superficial.

No capítulo 5 é apresentado o caso de estudo, onde os módulos supra citados são aplicados a imagens térmicas recolhidas de dois edifícios distintos no campus da Universidade de Aveiro, com a finalidade de demonstrar as potencialidades da metodologia desenvolvida em proceder à análise de imagens térmicas obtidas recorrendo à termografia passiva, e identificar algumas ineficiências dos edifícios analisados.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões retiradas da realização deste trabalho e dadas algumas perspectivas futuras de continuação do trabalho.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Termografia e equipamentos

2.1.1. Radiação infravermelha

A radiação infravermelha é um tipo de energia electromagnética idêntica à radiação visível, ondas rádio e raios-X, que se desloca à velocidade da luz sob a forma de onda sinusoidal diferindo apenas no comprimento de onda, e onde todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto a emitem e a absorvem. A radiação infravermelha localiza-se no espectro electromagnético entre a luz visível e as ondas rádio.

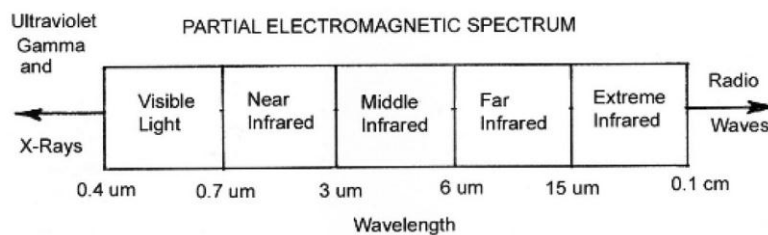


Figura 2.1 – Espectro electromagnético parcial [Mix, 2005]

No quadro seguinte é apresentada a subdivisão da radiação infravermelha adoptada neste trabalho, a mesma utilizada por diversos autores [Clark *et al.*, 2003; Ibarra-Castanedo *et al.*, 2007].

Quadro 2.1 - Sub-regiões da radiação infravermelha

Sub-Região	Comprimento de onda (μm)
Próximo - NIR	0.75 - 1
Curto - SWIR	1 - 3
Médio - MIR	3 - 5
Longo - LWIR	8 - 14
Muito Longo - VLWIR	14 - 1000

Silva [2007] afirma que é no intervalo de 8 a 14 μm que se encontra o pico de emissão de radiação infravermelha de qualquer corpo com uma temperatura compreendida entre -50 °C e 50°C. Walker [1998], por sua vez, refere que é no intervalo espectral de 3 a 12 μm que a radiação infravermelha mais se evidencia, embora realce que na atmosfera terrestre a transferência de radiação difere consoante o comprimento de onda, e que a atmosfera apenas transmite o valor da radiação emitida com menor atenuação em dois intervalos distintos, de 3 a 5 μm , e de 8 a 12 μm .

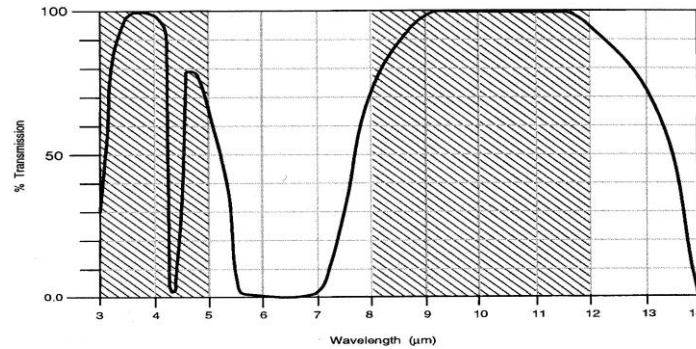


Figura 2.2 – Transmissão da radiação infravermelha na atmosfera [Walker, 1998]

A limitação da transmissão de radiação infravermelha pela atmosfera ocorre devido à absorção de parte da radiação pelo dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O) presentes na atmosfera.

2.1.2. Termografia por infravermelhos

A termografia por infravermelhos é então a técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objecto, que é invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda, em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Para tal, é utilizado um equipamento de termografia por infravermelhos que capta a radiação térmica (ou infravermelha) emitida pela superfície em estudo sem a necessidade de qualquer contacto.

A termografia por infravermelhos é uma importante técnica não destrutiva com diversas aplicações, mas que necessita que se verifique três condições para a sua aplicabilidade [Titman, 2001]:

- I. O objecto ou superfície tem de apresentar uma temperatura diferente do meio em que se encontra inserido de modo a realçar a sua localização;
- II. Se na presença de um gradiente térmico, o objecto com as mesmas propriedades em toda a sua superfície apresentar flutuações de temperatura numa determinada zona, então estaremos possivelmente perante um defeito ou uma omissão de material;
- III. Na ausência das condições anteriores pode ser aplicada uma fonte de calor ou de frio na superfície com diferentes taxas e temperaturas de modo a realçar anomalias ou defeitos.

A presença de defeitos a uma certa profundidade da superfície interfere com o fluxo de calor que a atravessa, causando variações locais da temperatura superficial, as quais podem ser detectadas através da aplicação da termografia por infravermelhos [Meola, 2007b].

2.1.2.1. Equipamentos

Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidos três tipos de sistemas para medição de temperatura por infravermelhos: os termómetros pontuais ou de ponto quente, os scanners de linha e as câmaras termográficas.

Os termómetros pontuais, tal como o nome indica, apenas fornecem a temperatura de um ponto na superfície, e embora não forneçam uma imagem térmica são aplicados em muitas técnicas não destrutivas.

Os scanners de linha captam a radiação infravermelha numa série de prismas e espelhos internos permitindo assim obter um perfil de temperatura ao longo de uma linha na superfície. A imagem térmica é construída com a repetição sucessiva do processo de captação ate atingir a imagem completa.

As câmaras termográficas são instrumentos que captam e convertem a radiação infravermelha emitida por uma superfície numa imagem térmica a duas dimensões numa escala de cores ou escala de cinza, representativa da temperatura a que se encontra a superfície.



Figura 2.3 – Câmara termográfica [Nec/Avio, 2009]

A câmara termográfica possui um detector que gera um sinal eléctrico em função da radiação que recebe, que por sua vez, é tratado por uma unidade de controlo que posteriormente disponibiliza a imagem térmica resultante num monitor. Assim, a temperatura da superfície em estudo é medida indirectamente a partir da radiação incidente no detector. Este equipamento é constituído por vários componentes, sendo os principais os seguintes:

- Lente
- Detector
- Processador electrónico
- Controlos
- Ecrã
- Armazenamento de informação
- Processamento de dados
- Software para gerar relatórios
- Filtros

Lente

A lente desempenha um papel importante num equipamento termográfico pois capta a radiação infravermelha incidente no detector, excluindo a radiação visível. Os materiais mais utilizados na construção da lente são o Germânio (Ge), Silício (Si) e cristais de Selenite de Zinco (ZnSe) e Sulfato de Zinco (ZnS), e a sua escolha tem um impacto directo na resolução da medição devido às diferentes curvas de transmissão, tal como se pode constatar na figura:

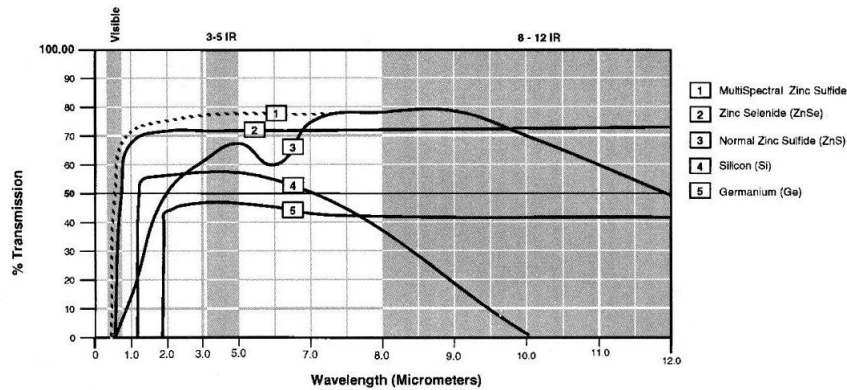


Figura 2.4 - Curvas de transmissão dos materiais mais utilizados em lentes [Walker, 1998]

As lentes possuem diferentes distâncias focais, e para a maioria das aplicações a lente apresenta um campo de visão entre 16° e 25°. Nas aplicações onde o espaço a inspecionar é limitado, ou o campo de visão é amplo, é recomendado a aplicação de uma lente com distância focal ampla [Hellier, 2003].

Detector

A radiação captada pela lente é canalizada para o detector que produz um sinal eléctrico. Rogalski [2003] realça que o detector é sensível apenas a dois intervalos de comprimento de onda, 3 a 5 μm (MIR) e 8 a 14 μm (FIR), devido sobretudo à influência da atmosfera na transmissão da radiação. De acordo com o mesmo autor, existem dois tipos de detectores, os quânticos e os térmicos.

Os detectores quânticos convertem directamente a radiação absorvida num sinal eléctrico, com uma resposta rápida e com uma margem de erro extremamente baixa, embora para atingir esta performance seja necessário um sistema de arrefecimento criogénico tornando o equipamento que opera com este tipo de detector muito dispendioso, complexo e pesado.

Já os detectores térmicos geram um sinal eléctrico em função da sua própria temperatura, que aumenta consoante a radiação infravermelha absorvida. O sistema FPA (*Focal Plane Array*) é um detector que utiliza uma matriz bidimensional de sensores ou microbolómetros, que captam numa só operação todos os pontos da imagem.

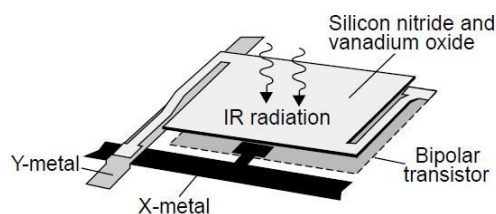


Figura 2.5 – Microbolómetro [Rogalski, 2003]

A qualidade da imagem térmica depende directamente da resolução do detector, ou seja, quantos mais sensores tiver melhor detalhe terá a imagem térmica captada. A resolução do detector pode variar entre os 80×80 píxeis a 1020×1020 píxeis.

Processador electrónico

A resposta do detector é processada de modo a produzir a imagem térmica e quantificar a temperatura.

Controlos

O sistema apresenta vários controlos que permitem ajustar diversos parâmetros, tais como, a entrada de radiação infravermelha, dados de saída, alcance, nível térmico, polaridade, emissividade, e outras funções de medição de temperatura, tais como, isotérmica, perfil ou área.

Filtros

Em muitas aplicações termográficas é necessária a colocação prévia de filtros especiais de modo a obter uma medição correcta. Antes da aplicação de qualquer filtro é importante conhecer em que intervalo do espectro electromagnético a resposta do sistema irá ocorrer, de forma a proceder à selecção correcta do filtro. Existem três designações de filtros:

- Filtro Passa - Alto Passagem de radiação com comprimento de onda curto
- Filtro Passa - Baixo Passagem de radiação com comprimento de onda longo
- Filtro Passa - Banda Passagem de radiação num intervalo pré-definido

Hellier [2003] sugere algumas das aplicações mais frequentes de filtros:

- Filtro de pico de chama
Suprime toda a radiação acima de $3.8 \mu\text{m}$ (sistemas *Short Wave*) ou $10.8 \mu\text{m}$ (sistemas *Long Wave*), possibilitando assim a visualização de objectos quentes através de chamas.
- Filtro de radiação solar
Suprime o efeito de brilho da radiação solar em sistemas SW através da exclusão de comprimento de onda abaixo dos $3 \mu\text{m}$.
- Filtros para superfícies de vidro
 - I. Avaliação da superfície de um vidro com a aplicação de filtro que descarta comprimentos de onda abaixo dos $4.8 \mu\text{m}$;
 - II. Avaliação através do vidro com a aplicação de filtro passa – banda para um valor de $2.35 \mu\text{m}$.

Alguns equipamentos já permitem o carregamento automático da curva de calibração no momento da instalação do filtro, embora seja necessária uma verificação regular da calibração para não afectar os valores medidos.

Ecrã

Os dados processados são disponibilizados no ecrã, incorporado ou não na câmara termográfica, e a imagem térmica é disponibilizada a cores ou em escala de cinzentos. A resolução do ecrã não tem qualquer influência na qualidade da imagem térmica captada devendo ter uma resolução superior ao do detector.

Armazenamento de dados

Os dados são armazenados, ou como imagem digital estática, ou em formato de vídeo, assim como a gravação digital de voz permitindo dispor de informação detalhada juntamente com a imagem.

Processamento de dados e Elaboração do Relatório

Os equipamentos de termografia por infravermelhos dispõem hoje em dia de programas dedicados para o processamento de dados que são instalados em computadores, e onde é possível importar as imagens a cores ou em escala de cinzentos para posterior manipulação de diversos parâmetros, tais como, a temperatura de fundo, emissividade, alcance e nível. As funções de análise são variadas podendo ser de ponto térmico, área, linhas isotérmicas, medição por linha térmica, assim como medição de dimensões. Os dados são disponibilizados em folhas de cálculo, gráficos ou histogramas, e a sua apresentação é feita em relatórios previamente configurados.

Escolha do equipamento de termografia

A existência de uma alargada oferta de equipamentos de termografia por infravermelhos no mercado actual dificulta a escolha do equipamento apropriado, onde a opção seleccionada depende principalmente do comprimento de onda da radiação infravermelha a captar.

Câmaras Termográficas				
Modelo	1	2	3	4
Gama de Temperaturas	0°C a 250°C	-20°C a 350°C	-40°C a 500°C	-20°C a 500°C
Sensibilidade	≤0,1°C a 25°C (100 mK)	≤0,1°C a 30°C (100 mK)	45 mK	0,08°C a 30°C
Precisão	± 2°C ou 2%	± 2°C ou 2%	± 1°C ou 1%	± 1°C ou 1%
Banda Espectral	7,5 a 13μm	7,5 a 14μm	7,5 a 13μm	8 a 14μm
Pixeis	80 x 80	640 x 480	640 x 480	640 x 480

Figura 2.6 - Modelos de câmaras de infravermelhos [Dinis, 2009]

Um objecto colocado numa sala a uma temperatura de 300K apresenta um ponto máximo de emissão de radiação infravermelha com um comprimento de onda de 10μm, mas já em aplicações

no exterior será necessário um equipamento capaz de captar comprimentos de onda superiores devido sobretudo à temperatura ambiente apresentar valores inferiores aos registados no interior de um edifício. Assim, são direccionadas para estudos em ambientes com grandes amplitudes térmicas, as câmaras termográficas com comprimento de onda curto, enquanto os equipamentos com um comprimento de onda longo são capazes de detectar pequenas diferenças de temperatura na ordem dos 0.08°C [Clark *et al.*, 2003].

Quadro 2.2 - Escolha do comprimento de onda da câmara termográfica [Clark *et al.*, 2003]

Ambiente do teste	Aplicação	Comprimento de onda da câmara
Diferença temperatura elevada	Ambiente de alta voltagem eléctrica	Médio - MIR
	Pavimento de betão numa zona com clima de deserto quente	Médio - MIR
Diferença temperatura baixa	Ponte de alvenaria ou betão no Reino Unido (UK)	Distante - FIR

Além do comprimento de onda captado, a câmara de infravermelhos deve possuir uma precisão na ordem dos $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$, e o modelo seleccionado deverá possibilitar a configuração e ajuste da emissividade da superfície ou do material avaliado, assegurando assim, a determinação correcta da temperatura.

Outro ponto de destaque é a resolução do detector de infravermelhos do equipamento, pois quanto maior for a resolução melhor será a qualidade da imagem térmica, que normalmente varia de 80×80 pixels a 1020×1020 pixels. A resolução mínima, ou sensibilidade térmica (*NEdT - Noise Equivalent Delta Temperature*), é a diferença mínima de temperatura detectada pela câmara que depende do tipo de detector e pode variar entre 0.020°C a 0.075°C .

A gama de medição de temperatura da câmara deve ser escolhida em função da temperatura dos elementos a medir, devendo esta estar obrigatoriamente compreendida no intervalo escolhido.

Quadro 2.3 - Gama temperaturas e resolução de alguns equipamentos [Flir Systems, 2010a]

Camera Model	Detector Type	Temp Resolution	Temp Range
A325	Microbolometer	0.075°C	-20° to $+120^{\circ}\text{C}$ $+0$ to $+350^{\circ}\text{C}$
Silver SC5200	Indium Antimonide	0.020°C	$-10^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$ $10^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ $50^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ $80^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ $150^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$
Titanium SC7700L	QWIP	0.025°C	-10° to $+80^{\circ}\text{C}$ $+50^{\circ}$ to $+200^{\circ}\text{C}$ $+150^{\circ}$ to $+600^{\circ}\text{C}$ $+350^{\circ}$ to $+1500^{\circ}\text{C}$

O tempo de exposição (*Thermal Time Constant/Integration Time*) é o tempo necessário à captura de uma imagem térmica, que em função da aplicação, deve ser cuidadosamente escolhido pois, caso ocorra a movimentação da câmara ou do objecto, ou a alteração repentina do gradiente térmico da superfície, pode dar origem a uma imagem desfocada. Este parâmetro está

directamente associado à sensibilidade do equipamento, pois uma boa resolução térmica necessita de menos tempo para captar uma imagem térmica detalhada.

A possibilidade do equipamento proceder ao registo fotográfico no domínio visível, conjuntamente com a imagem térmica permite simplificar a documentação de todas as situações avaliadas. Também é interessante possuir iluminação integrada para a obtenção de fotografias digitais em locais pouco iluminados, ampliando assim o campo de actuação do equipamento escolhido.

A portabilidade da câmara termográfica obriga a uma alimentação com recurso a uma bateria recarregável, devendo ser salvaguardada a possibilidade de substituição no local por outra carregada.

O programa (ou software) que acompanha o equipamento deve ser considerado no momento da escolha, devendo ser escolhidos os modelos que permitam o funcionamento de programas mais avançados pois além de apresentarem mais funções, garantem também a longevidade da câmara termográfica.

A longevidade do equipamento passa também pela aquisição de um modelo que permita a integração de diversos módulos.

2.1.2.2. Termografia qualitativa e quantitativa

As câmaras termográficas são capazes de detectar variações de temperatura numa superfície tanto qualitativamente como quantitativamente, dependendo do tipo de análise desejado.

A termografia qualitativa passa por uma análise simples da imagem térmica, registando apenas a diferença local da temperatura superficial na superfície, indicando assim a existência de uma anomalia.

Na termografia quantitativa, a análise da imagem térmica passa por quantificar as variações de temperatura superficial existentes que poderão indicar uma anomalia na superfície, sendo necessário registar e posteriormente introduzir uma série de parâmetros num programa dedicado para o efeito, tais como, a temperatura ambiente, humidade, distância à superfície e emissividade.

2.1.2.3. Termografia activa e passiva

Um estudo termográfico pode ser abordado de duas formas: termografia passiva ou termografia activa [Ibarra-Castanedo *et al.*, 2007].

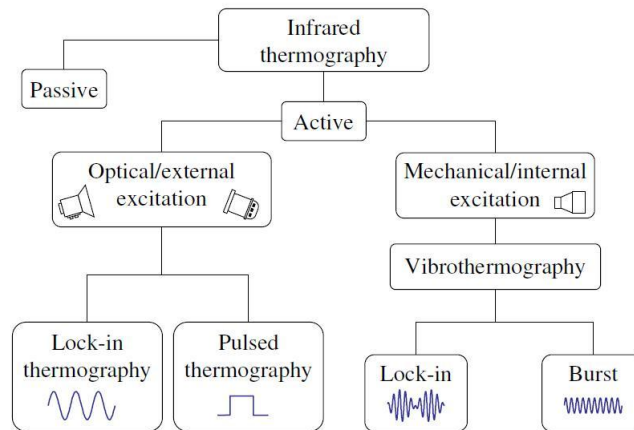


Figura 2.7 – Técnicas mais comuns em termografia [Ibarra-Castanedo *et al.*, 2007]

Na termografia activa, a superfície em estudo é aquecida ou arrefecida artificialmente de modo a produzir um contraste térmico em zonas que se encontram em equilíbrio térmico. A captação da imagem termográfica é realizada durante o período de retorno ao estado de equilíbrio térmico. O contraste térmico pode ser induzido recorrendo a variadas fontes de energia que divergem na forma como interferem com a superfície em estudo. Ibarra-Castanedo *et al.* [2007] classifica-as como externa, quando a energia incide sobre a superfície propagando-se através do material até encontrar a anomalia; ou como interna, onde a energia é injectada directamente no espécime de modo a realçar os defeitos existentes.

Na termografia activa com estimulação externa recorre-se frequentemente a sistemas ópticos, tais como lâmpadas de halogéneo (aquecimento periódico), ou a flashes fotográficos (aquecimento de impulso modelado). As técnicas aplicadas diferem no tipo de sinal utilizado, distinguindo-se a *termografia de amplitude modelada* (“*Lock-in Thermography*”) e a *termografia de impulso* (“*Pulsed Thermography*”). Os defeitos internos actuam como uma barreira à propagação de calor, alterando a amplitude e a fase da resposta recolhida na superfície através da câmara de infravermelhos.

A técnica aplicada em termografia activa de estimulação interna, a *termografia de ultra-som* ou *vibrotermografia*, utiliza um sistema ultra-sónico que provoca a vibração das partículas sem a necessidade de aquecer a superfície. As ondas ultra-sónicas deslocam-se através do material e dissipam a energia maioritariamente nas anomalias, provocando assim uma libertação local de calor, que por sua vez se desloca para a superfície, sendo detectado pela câmara de infravermelhos. A vibrotermografia subdivide-se, de modo análogo à técnica activa de solicitação externa, em função do tipo e amplitude do sinal ultra-sónico como: *vibrotermografia de amplitude modelada* (“*Lock-in Vibrothermography*”), ou *vibrotermografia por impulso* (“*Burst vibrothermography*”).

No caso da termografia passiva o estudo ocorre sem a interferência de qualquer fonte artificial externa de aquecimento (ou arrefecimento) ao estado natural da superfície, a qual se encontra a uma temperatura normalmente superior à temperatura ambiente, onde é considerada como fonte natural a irradiação solar ou o calor proveniente do próprio processo. A principal vantagem desta abordagem é que o único equipamento necessário é a câmara de infravermelhos. A abordagem passiva é aplicada ao estudo de grandes estruturas como pontes e edifícios, mas também com sucesso em medicina, manutenção de sistemas e componentes, assim como na avaliação de diversos processos industriais.

Na termografia passiva as diferenças de temperatura relativamente à vizinhança são pequenas, normalmente 1°C a 2°C, mas tendo em conta a evolução dos equipamentos cuja resolução facilmente detecta variações na ordem dos 0.1 a 0.2°C, as aplicações passaram do campo qualitativo para a análise quantitativa.

2.1.2.4. Vantagens e limitações da termografia

Uma das vantagens da termografia por infravermelhos é não haver a necessidade do contacto directo entre a câmara e a superfície em estudo, podendo a distância entre ambos variar de alguns milímetros até vários quilómetros, permitindo assim o estudo de objectos e zonas consideradas potencialmente perigosas, sem qualquer perigo para o equipamento e respectivo operador. Deste modo é possível realizar o estudo sem que as instalações ou os sistemas tenham de ser encerrados ou desligados, tornando este tipo de ensaio não destrutivo (*NDT- Non-Destructive Testing*) muito eficiente em termos de tempo e de custos.

Outra vantagem das câmaras termográficas é a sua grande capacidade de monitorização, onde é possível fazer a monitorização simultânea e em tempo real de diversos pontos no mesmo cenário. Além disso, a escala de medição pode ser variada através do ajuste da abertura das lentes da câmara, mas também recorrendo à aplicação de vários filtros, controlando assim a sensibilidade do sistema e a sua resposta ajustada à radiação térmica captada. A escala de temperaturas típica varia entre os -20°C e os 1600°C.

O estudo termográfico não necessita de qualquer fonte de iluminação externa logo poderá ser realizado tanto de dia como de noite e deste modo todos os objectos visualmente encobertos ou obscuros são facilmente detectáveis [Maldague, 2000; Titman, 2001; Clark *et al.*, 2003].

Actualmente os equipamentos de termografia por infravermelhos além de apresentarem capacidade de detecção de pequenas flutuações de temperatura (até um valor de 0.04°C no caso da NEC/AVIO®-TH9100MLN usada neste estudo), são cada vez mais compactos e facilmente transportáveis, aumentando assim quer o leque de aplicações quer a sua utilização em movimento.

A obtenção e análise da imagem térmica requer uma atenção cuidada sendo necessária a qualificação do técnico que regista e interpreta os resultados, devido à complexidade das soluções construtivas e dos mecanismos que influenciam a captação da radiação infravermelha.

A definição da emissividade da superfície em estudo é o parâmetro mais significativo em qualquer avaliação termográfica, pois uma variação acentuada da emissividade ao longo da superfície implica a obtenção de um perfil de temperaturas incorrecto, podendo levar a uma conclusão errada dos resultados.

Uma das limitações da termografia deve-se ao efeito da atenuação da radiação infravermelha na atmosfera causada pela absorção de energia por partículas em suspensão, dióxido de carbono e vapor de água, e subsequente difusão em direcções aleatórias podendo afectar os resultados obtidos, embora estes efeitos possam ser desprezados para os casos onde a distância entre o sistema de infravermelhos e o objecto é pequena.

Outros problemas poderão surgir quando a termografia por infravermelhos é aplicada no exterior, tais como a presença de obstáculos entre a câmara de infravermelhos e o objecto que poderão afectar a temperatura., e.g., pontes, árvores, pequena vegetação, esgotos e terraplanagens. A presença de cabos eléctricos também é de ter em conta, pois estão sujeitos ao efeito de Joule, podendo limitar a altura máxima em que o estudo pode ser conduzido.

A altura do dia e as condições atmosféricas que se fazem sentir durante a avaliação têm um impacto directo nos resultados obtidos, assim como a radiação solar incidente sobre a superfície pode elevar a temperatura, a chuva e o vento poderão provocar uma descida da mesma [Maldague, 2000; Titman, 2001; Clark *et al.*, 2003].

Quadro 2.4 – Vantagens e limitações da termografia por infravermelhos

Vantagens	Limitações
Inspecção rápida e em tempo real;	Custo equipamento;
Segura (sem contacto);	Presença de obstáculos;
Fácil interpretação qualitativa;	Necessidade pessoal qualificado para interpretação quantitativa;
Diagnóstico de defeitos em vasta escala;	Influência de parâmetros de difícil controlo;
Não necessita de iluminação externa (ensaios nocturnos);	Dificuldade de aquecimento uniforme numa grande área (em Termografia Activa);
Equipamento leve e portátil (variadas aplicações);	Influência de objectos na vizinhança;
Utilização em movimento;	Problemas com a emissividade;
Detecção de pequenas variações de temperatura.	

2.1.2.5. Aplicações da termografia

A termografia por infravermelhos pela sua característica não destrutiva (*NDT/NDE*) é uma técnica que vem sendo empregue em muitas áreas e em variadas aplicações. Os sistemas de termografia por infravermelhos ao longo dos anos têm-se tornado cada vez mais leves e compactos, aumentando assim o campo de actuação pois podem ser facilmente transportados.

Astronomia e exploração espacial

Apenas uma pequena porção da radiação infravermelha presente no Universo atinge a superfície da Terra e a termografia é aplicada no seu estudo. O espaço é composto por regiões que se encontram envolvidas por gases e poeiras densas onde os telescópios ópticos não conseguem penetrar e recolher informação. Este problema foi ultrapassado recorrendo à termografia, que devido à radiação infravermelha apresentar um comprimento de onda superior à da radiação visível, não se dissipa ao atravessar estas regiões. Desde 1980 tem sido colocado em órbita vários satélites espaciais com telescópios de infravermelhos (*IRAS – Infrared Astronomical Satellite*) para apoio à astronomia [Ipac, 2009].

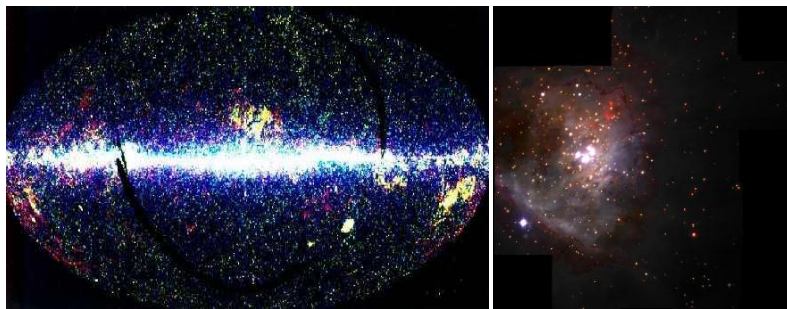


Figura 2.8 - Imagens térmicas espaciais captadas pelo IRAS [Ipac, 2009]

Avaliação da eficiência de fornos e caldeiras

A câmara termográfica é um equipamento extremamente útil na avaliação da eficiência energética de fornos e caldeiras devido às altas temperaturas em que operam.

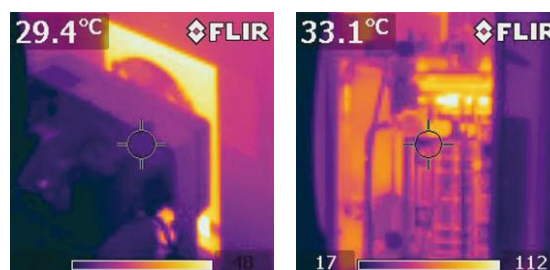


Figura 2.9 - Avaliação de caldeiras através de imagens térmicas [Flir Systems, 2010a]

A avaliação da eficiência de fornos passa pelo estudo da espessura das paredes do refractário, localização de fugas de calor, verificação do estado de funcionamento dos queimadores e controlo da temperatura.

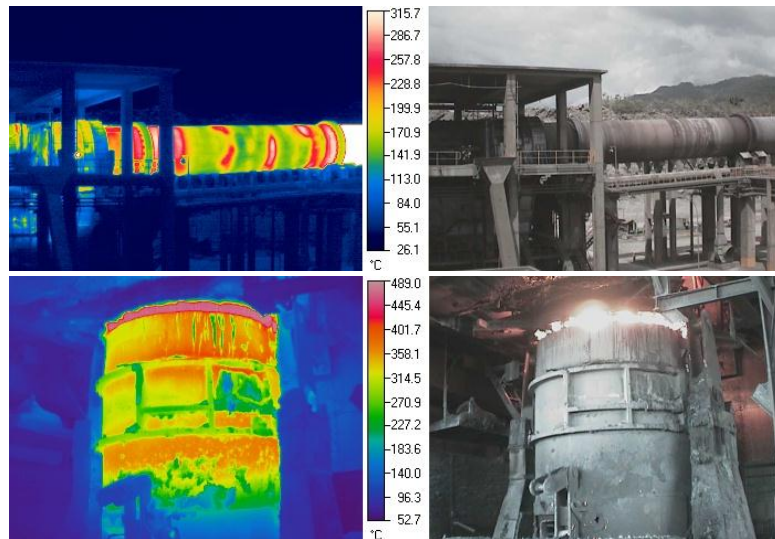


Figura 2.10 - Avaliação de fornos industriais através da termografia [Nec/Avio, 2009]

Estudo de materiais

Barreira *et al.* [2007] avaliaram o conforto térmico de alguns materiais usualmente aplicados em pavimentos interiores através de uma comparação de imagens térmicas de uma sola de um pé humano que esteve em contacto com os diferentes materiais.

A termografia por infravermelhos tem sido utilizada na quantificação de vários parâmetros térmicos e geométricos de materiais, como por exemplo, o trabalho de Silva [2007] onde foi avaliada uma placa de gesso com inclusões metálicas através da resolução de um problema inverso de condução de calor com base nos dados obtidos através da termografia.

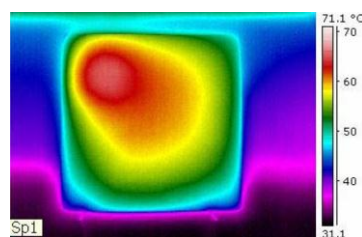


Figura 2.11 - Placa de gesso com inclusão metálica [Silva, 2007]

Construção civil

A termografia por infravermelhos tem vindo a ser aplicada para verificar o estado de conservação de diversas estruturas em engenharia civil. Clark *et al.* [2003] demonstram no seu trabalho que a termografia por infravermelhos pode ser aplicada na detecção de anomalias e avaliação

qualitativa de pontes em betão e alvenaria, mesmo em ambientes com baixa temperatura, tais como os verificados no Reino Unido e na Europa, chegando a ser avaliadas anomalias com um diferencial de temperatura entre a zona não afectada de aproximadamente 0.2 °C a 0.3 °C.

Edifícios

A termografia aplicada aos edifícios é utilizada na detecção de diversos tipos de patologias que afectam a envolvente de edifícios, identificação de pontes térmicas, detecção de problemas em coberturas, detecção de fugas de ar através das janelas ou através da envolvente opaca, e ainda a inspecção de instalações eléctricas, avaliação de sistemas de climatização, que englobam sistemas mecânicos de movimentação de fluidos, condutas, tubagens e motores eléctricos.

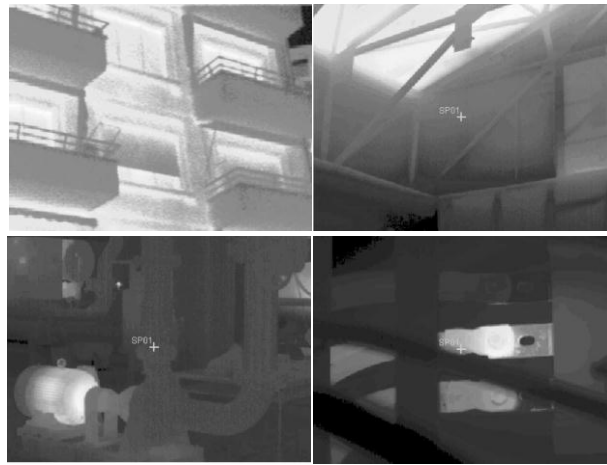


Figura 2.12 - Aplicações da termografia em edifícios [Balaras *et al.*, 2002]

Indústria aeronáutica e aeroespacial

A aplicação de materiais compósitos na indústria aeronáutica e aeroespacial tem vindo a crescer nos últimos anos, o que proporciona o desenvolvimento de novas técnicas de controlo de qualidade. Assim, a termografia por infravermelhos surge como uma ferramenta de controlo de qualidade, e que através da avaliação das características térmicas, detecta falhas, defeitos e anomalias nestes materiais.

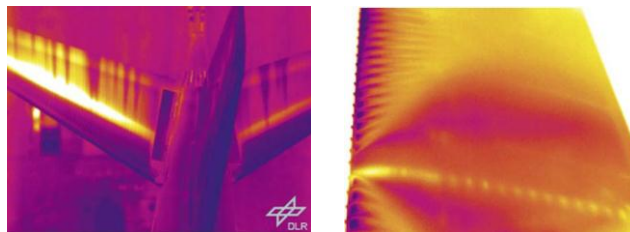


Figura 2.13 - Termografia aplicada à aeronáutica [Flir Systems, 2010a]

A termografia também tem sido aplicada no estudo térmico de pás e de reactores de aeronaves.

Indústria automóvel

Na indústria automóvel a termografia por infravermelhos é aplicada na avaliação de desempenho de diversos componentes.

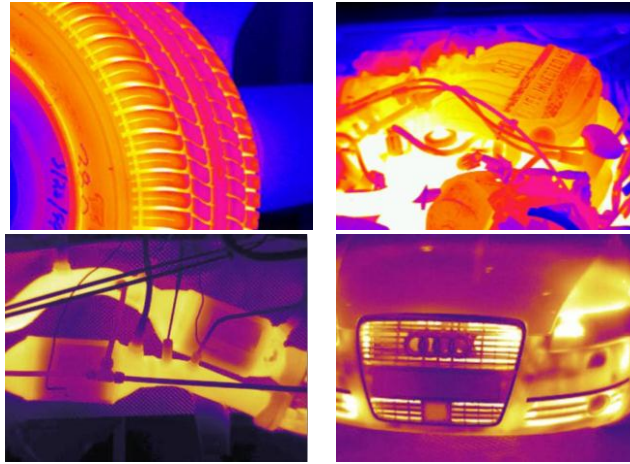


Figura 2.14 - Termografia aplicada à indústria automóvel [Flir Systems, 2010a]

Omar *et al.* [2006] desenvolveram um sistema automático de captação de imagens térmicas para detecção de pontos de descontinuidade em pinturas recentes em painéis de automóveis causados por poeiras e contaminantes que estão normalmente presentes neste tipo de ambiente industrial, e que por sua vez, afectam negativamente o acabamento final das peças, contribuindo para o aparecimento futuro de pontos de corrosão.

Indústria electrónica

Na indústria electrónica, a termografia é utilizada na concepção, fabrico e controlo de qualidade de circuitos integrados e componentes electrónicos, assim como, a sua reparação com a observação da distribuição de temperatura.

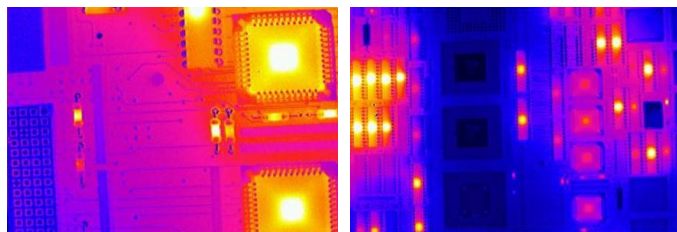


Figura 2.15 - Imagens térmicas de circuitos eléctricos [Flir Systems, 2010a]

Manutenção de sistemas eléctricos

Na manutenção de instalações eléctricas é muito frequente recorrer à termografia por infravermelhos devido à rapidez e segurança da avaliação pois não necessita de qualquer

contacto com os elementos a avaliar. A avaliação passa por localizar aquecimentos excessivos em ligações, contactos de interruptores e em componentes electrónicos, e ainda para detectar conexões mal apertadas em quadros eléctricos, aquecimentos nos terminais de transformadores e cabos de alta tensão [Hellier, 2003].

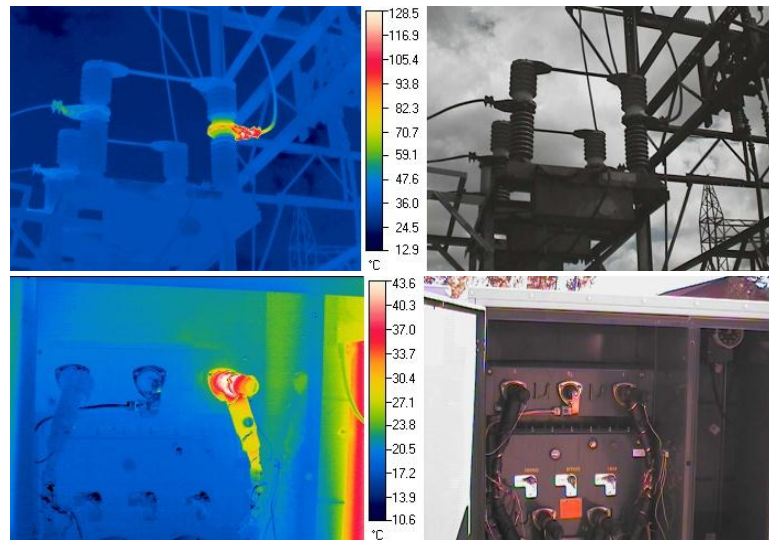


Figura 2.16 – Imagens térmicas de sistemas eléctricos [Nec/Avio, 2009]

Sistemas de vigilância contra incêndios

A termografia por infravermelhos tem sido aplicada na prevenção e detecção de incêndios em locais de armazenamento de combustíveis, depósitos de lixo sólidos. É também aplicada na monitorização e controlo da chama de queima dos gases resultantes do processo produtivo de refinarias e petroquímicas.

Manutenção de sistemas mecânicos

A aplicação da termografia na manutenção sistemas mecânicos tem assumido um papel relevante na detecção de componentes com anomalias ou defeitos permitindo a sua troca antes do colapso total, evitando avultados danos em componentes agregados e, ou no sistema mecânico.

Tendo em consideração que grande parte da energia eléctrica produzida em Portugal é consumida por motores eléctricos, a termografia assume-se como uma ferramenta extremamente eficaz no combate ao desperdício de energia eléctrica causado por anomalias, mau funcionamento e baixo rendimento destes equipamentos.

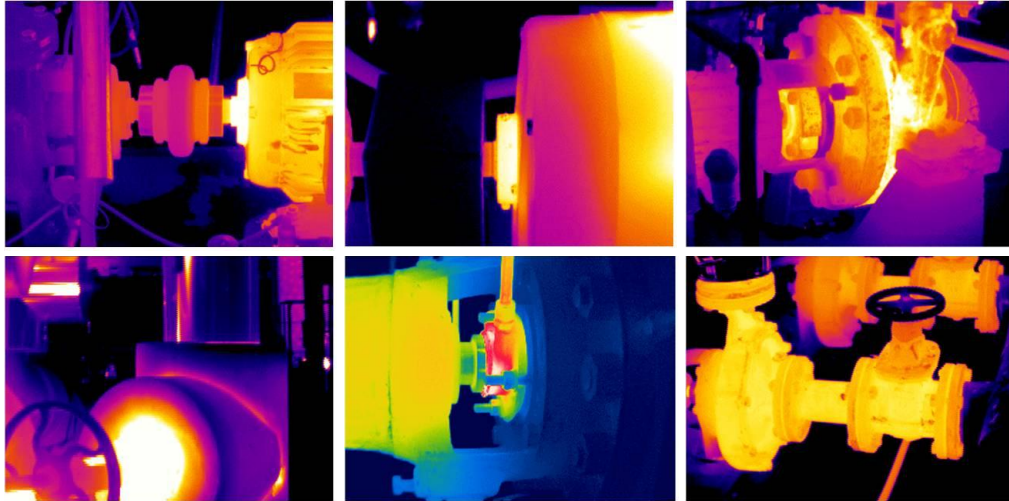


Figura 2.17 - Termografia aplicada na manutenção de sistemas mecânicos [Barreira, 2004]

A termografia é utilizada, entre outras aplicações, na análise de aquecimento em chumaceiras, detecção de aquecimento por fricção, avaliação de desgaste de rolamentos, estudo de aquecimento de escovas e determinação do estado de bobinas.

Monitorização de níveis de reservatórios

Uma das aplicações mais usuais e extremamente simples da termografia é a monitorização do nível de diversos produtos em reservatórios, tanques ou silos. Deste modo é possível localizar o nível de um produto independentemente do estado físico e do grau de perigosidade que apresente.

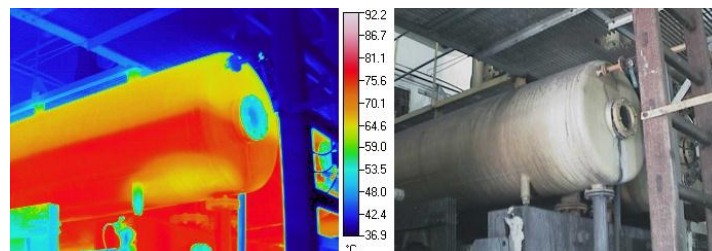


Figura 2.18 - Verificação de nível de um reservatório [Nec/Avio, 2009]

Obstruções nas linhas de alimentação, falhas e zonas danificadas no isolamento destes sistemas são também facilmente detectados com uma câmara de infravermelhos.



Figura 2.19 - Verificação térmica de linhas de alimentação de tanques [Nec/Avio, 2009]

Monitorização e controlo de processos industriais

Nos últimos anos a termografia por infravermelhos tem vindo a ser progressivamente aplicada à monitorização e controlo de diversos processos industriais.

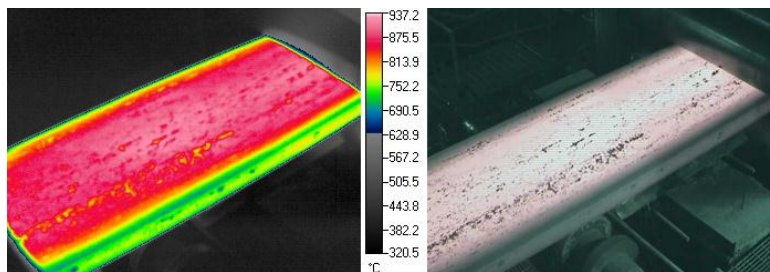


Figura 2.20 - Imagem térmica do processo de laminagem de aço [Nec/Avio, 2009]

Madruga *et al.*[2005] aplicaram a termografia na monitorização e controlo em tempo real do processo de arrefecimento no fabrico de recipientes para transporte de combustível nuclear, onde o aparecimento de defeitos é evitado através do controlo dos gradientes térmicos provocados durante o processo de arrefecimento.

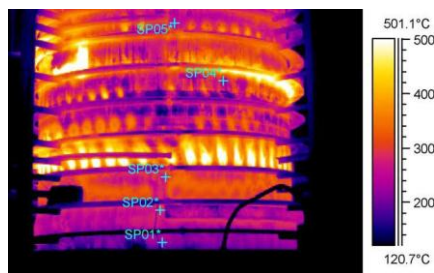


Figura 2.21 – Recipiente para transporte de combustível nuclear [Madruga *et al.*, 2005]

Segurança e vigilância

A termografia por infravermelhos vem sendo aplicada em sistemas de segurança, policiamento, vigilância aérea, visão noturna, visão através de fumo e nevoeiro, buscas e salvamento, navegação e controlo de tráfego marítimo.

Militares

Durante muitos anos o principal campo de actuação da termografia por infravermelhos foi o das aplicações militares, sendo inúmeras as aplicações desenvolvidas nesta área e que gradualmente passaram para o campo comercial.

Os sistemas de termografia por infravermelhos permitem a medição da radiação térmica emitida por diversos veículos de combate, tais como aviões, navios e tanques, e detectar se estes foram utilizados recentemente ou se estão preparados para partir, ou ainda proceder à localização de alvos no campo de combate.



Figura 2.22 - Imagens térmicas de veículos militares [Du Bosq *et al.*, 2009] [Doe *et al.*, 2009]

Deans *et al.* [2006] desenvolveram um novo método de detecção de minas terrestres, onde promoveram o aquecimento de uma superfície constituída por areia com lâmpadas de alta potência e através da análise da imagem térmica da superfície proceder à localização de discontinuidades térmicas.

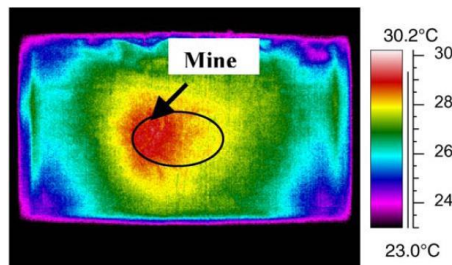


Figura 2.23 - Imagem térmica de uma mina terrestre [Deans *et al.*, 2006]

Este método tenta suprimir a necessidade criada pela nova construção deste tipo de minas cuja utilização limitada de elementos metálicos tornou obsoleta algumas das técnicas convencionais anteriormente utilizadas

Medicina

A termografia por infravermelhos aplicada à medicina surge como uma técnica extremamente útil devido à sua abordagem não invasiva na análise de fluidos e tecidos humanos. De acordo com Diakides *et al.* [2008], o estudo termográfico passa pela análise da actividade metabólica do tecido humano e na detecção de padrões térmicos superficiais na distribuição de temperatura do corpo, e de modo não invasivo detectar precocemente anormalidades existentes. Identifica ainda a aplicação da termografia por infravermelhos em áreas como a oncologia, dor crónica e

inflamações, problemas vasculares, artrite e reumatismo, neurologia, cirurgia, oftalmologia, dermatologia, medicina dentária, medicina de reabilitação e doenças respiratórias.

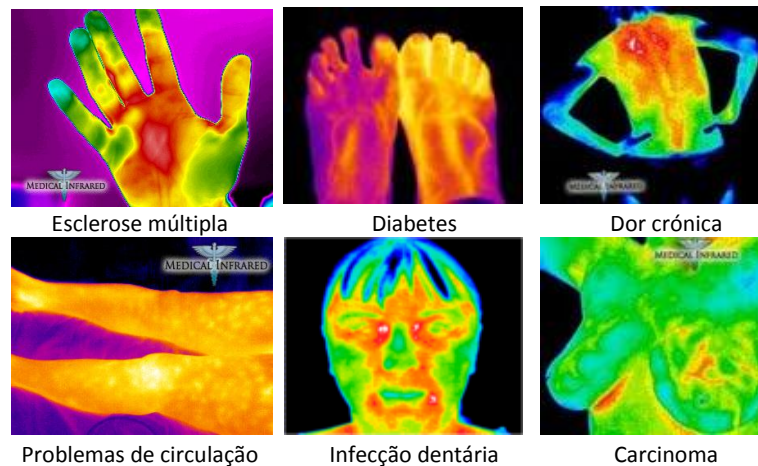


Figura 2.24 – Imagens térmicas de aplicações em medicina [Medical Infrared, 2009]

A termografia por infravermelhos tem sido aplicada eficazmente na detecção e despiste de doenças altamente contagiosas em aeroportos, onde é verificado se a temperatura do corpo é elevada, sintoma denunciativo de uma possível infecção.

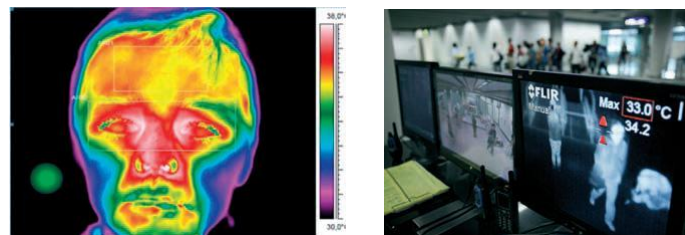


Figura 2.25 - Aplicação da termografia em aeroportos para despiste de doenças [Flir Systems, 2010a]

Medicina veterinária

A aplicação da termografia na medicina veterinária possibilita um meio de diagnóstico sem contacto reduzindo o nível de stress do animal durante o exame médico. Schaefer *et al.* [2007] estudou a aplicação da termografia na detecção da doença respiratória em bovinos de modo a minimizar a contaminação entre os animais, concluindo que a termografia por infravermelhos é um recurso eficaz na detecção da doença respiratória, chegando mesmo a detectar animais contaminados uma semana antes de qualquer manifestação de sintomas da doença.

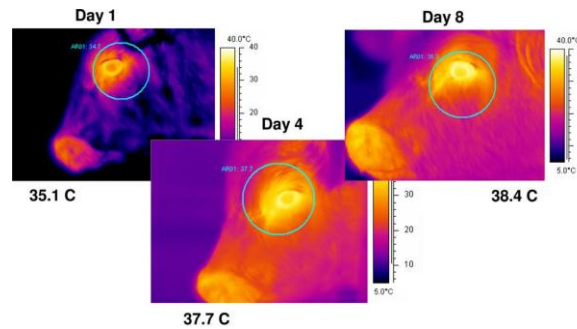


Figura 2.26 - Termografia aplicada ao estudo de doenças em animais [Schaefer *et al.*, 2007]

Actualmente, a termografia vem sendo aplicada em competições equestres como meio de despistagem de substâncias dopantes, em que os animais cuja diferença de temperatura dos membros inferiores ultrapasse os 2°C serão sujeitos a exames clínicos. Os veterinários contam com a termografia para diagnosticar problemas no dorso, abscessos do casco, lesões nervosas e musculares, atrofias musculares, lesões nervosas e musculares [Rosa Santos, 2009].

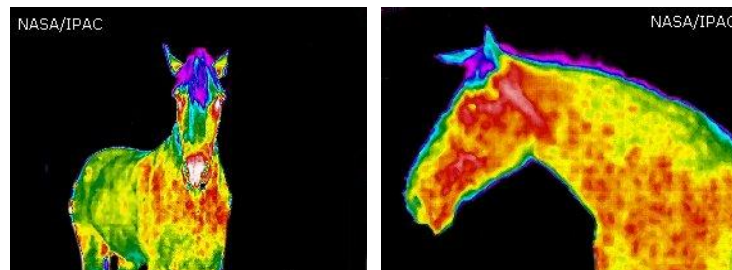


Figura 2.27 – Termografia em aplicações veterinárias [Ipac, 2009]

Vulcanologia

A termografia tem sido aplicada à vulcanologia, nomeadamente na monitorização da actividade vulcânica e previsão de novas erupções, pois proporciona uma recolha segura de informação através de uma medição térmica durante as erupções vulcânicas. Desde modo é possível definir a quantidade e a composição dos fluxos de lava e gases expelidos.

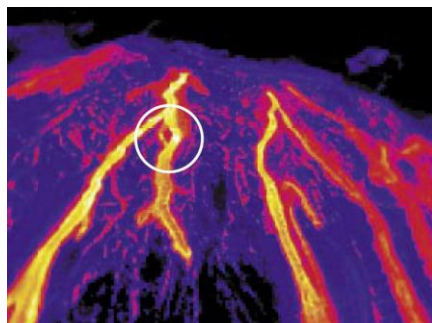


Figura 2.28 - Termografia aplicada ao estudo vulcânico [Flir Systems, 2010a]

2.2. Transferência de Calor

A termodinâmica estuda as trocas de energia, sob a forma de trabalho e calor, de um sistema com a sua vizinhança mas não aborda o mecanismo que provoca a transferência de calor, nem permite determinar a taxa de transferência de calor. Assim sendo, a termodinâmica estuda os estados de equilíbrio e para sistemas em equilíbrio termodinâmico não existem gradientes de temperatura, pelo que não há transferência calor.

A energia pode ser convertida em várias formas, mas durante todas estas conversões não se perde, este princípio é conhecido como a *Primeira Lei da Termodinâmica*, e um dos produtos decorrentes destas conversões de energia é dado sob a forma de calor ou energia térmica.

A *Segunda Lei da Termodinâmica* define que a existência de uma diferença de temperatura num meio ou sistema está associada a um fenómeno de transferência de energia térmica de uma zona onde a temperatura é superior para outra a temperatura inferior, até atingir o equilíbrio de temperatura.

A transferência de energia térmica resulta, ou da transferência de electrões, ou do aumento da vibração inter-atómica/molecular, mas segundo dois regimes distintos: regime estacionário e regime transiente. Em regime estacionário, a transferência de calor é constante e ocorre segundo a mesma direcção ao longo do tempo, embora o termo mais preciso seja quase - estacionário devido à existência de pequenas flutuações transientes normalmente desprezadas. Já em regime transiente, a transferência de calor e a temperatura variam significativamente ao longo do tempo [Incropera *et al.*, 2007]. Na termografia por infravermelhos é importante conhecer o movimento da energia térmica, tornando-se necessário identificar em que tipo de regime está a ocorrer a transferência de calor observada [Hellier, 2003].

Com as mudanças de fase ou de estado dos materiais a energia térmica é libertada ou absorvida. Quando a mudança é de fase sólida para líquida ou de líquida para gasosa, o processo requer a absorção de energia para quebrar as ligações entre as partículas. Perante o processo inverso, a energia que mantém os altos estados de energia deixa de ser necessária e é libertada. Esta energia libertada é referenciada como calor latente e é independente da temperatura de mudança do material. O impacto do calor latente numa superfície, em estudo através de termografia por infravermelhos, pode ser significativo dependendo da aplicação pois pode deformar a assinatura térmica da anomalia existente e induzir a conclusões erradas na avaliação [Hellier, 2003].

A energia térmica ou calor pode ser transferida por qualquer um dos três modos:

- Radiação
- Condução
- Convecção

2.2.1. Radiação

A radiação térmica, ou apenas radiação, é a energia térmica transmitida por toda a matéria que se encontra a uma temperatura acima do zero absoluto (-273°C). Assim, todas as substâncias emitem e absorvem energia por radiação qualquer que seja a temperatura a que se encontrem.

Embora a emissão da radiação ocorra em diferentes comprimentos de onda, existe um intervalo do espectro electromagnético no qual ela se detecta sob a forma de calor, como se demonstra na figura:

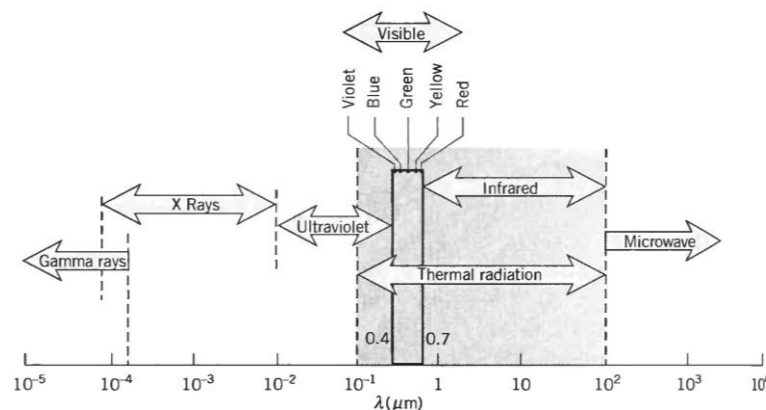


Figura 2.29 - Espectro electromagnético [Incropera *et al.*, 2007]

O mecanismo responsável pela radiação é a emissão de energia sob a forma de ondas electromagnéticas, facto observável em todas as formas de matéria como consequência da variação dos níveis de energia dos electrões constituintes dos átomos ou moléculas dessas substâncias. Este é portanto o único modo de transferência de calor que não requer a presença de um meio material, i.e., transmite-se no vácuo, ao contrário da condução e da convecção [Incropera *et al.*, 2007].

2.2.1.1. Corpo negro

Para definir as características radiantes das superfícies reais é necessário introduzir o conceito de corpo negro, como aquele que, absorve toda a radiação incidente independentemente da direcção ou do comprimento de onda.

A Lei de *Planck* descreve matematicamente as propriedades de um corpo negro em função da temperatura e comprimento de onda da radiação. A relação de distribuição espectral da radiação térmica com a temperatura está representada na seguinte figura.

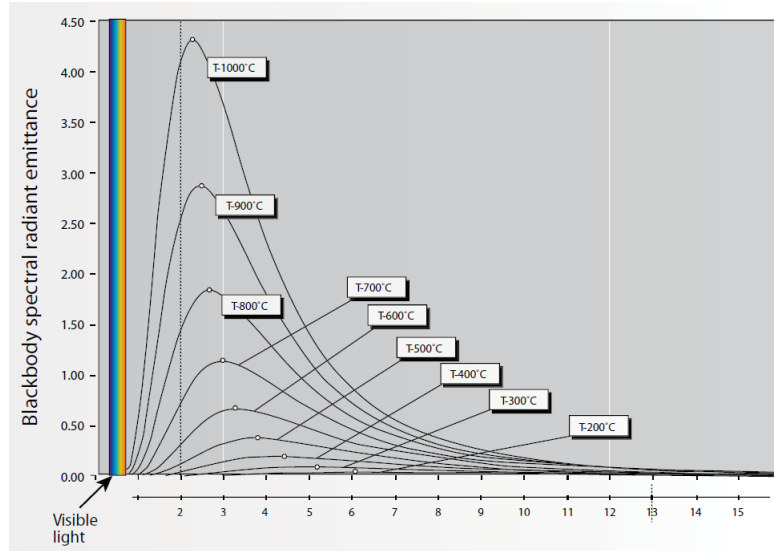


Figura 2.30 – Ilustração da Lei de Planck [Flir Systems, 2010b]

As curvas acima representam a radiação por comprimento de onda e unidade de área, e verifica-se que quanto maior a temperatura mais intensa é a radiação emitida. O ponto máximo de cada curva difere em função do comprimento de onda e é determinado pela Lei do Deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad \mu m \quad (2.1)$$

O corpo negro define o caso ideal de transferência de calor por radiação, e o poder emissivo máximo para a superfície é definido pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad W.m^{-2} \quad (2.2)$$

onde E_b é o poder emissivo máximo (expresso em $W.m^{-2}$), T_s a temperatura absoluta da superfície (expressa em K), e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$).

2.2.1.2. Superfície real

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é inferior ao de um corpo negro sujeito à mesma temperatura assim, surge a necessidade de introduzir um factor de correcção, a emissividade.

$$q''_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad W.m^{-2} \quad (2.3)$$

2.2.1.3. Emissividade

A emissividade é então definida como a eficiência com que a superfície real emite radiação comparativamente com um corpo negro sujeito à mesma temperatura e assume valores entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Um corpo real não apresenta o mesmo valor de emissividade em todos os comprimentos de onda, contudo, esta variação embora relevante, não impossibilita a aplicação da termografia por infravermelhos pois esta opera em intervalos limitados do espectro electromagnético.

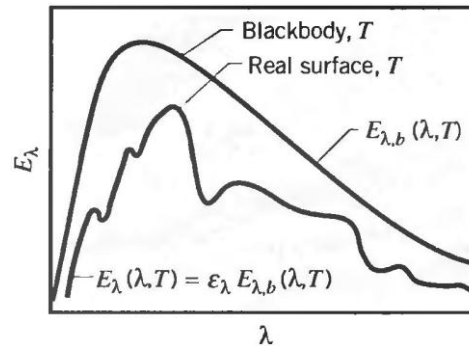


Figura 2.31 - Emissividade de um corpo negro e de uma superfície real [Incropera *et al.*, 2007]

A emissividade é uma propriedade da superfície cujo valor é influenciado por diversos factores, tais como, a orientação e condição da superfície, temperatura, comprimento de onda da radiação e tipo de material [Maldague, 2000; Hellier, 2003].

É recomendado que a medição da temperatura de uma superfície com recurso à termografia por infravermelhos, caso ocorra fora do meio laboratorial sob condições não controladas, se realize apenas para valores de ε superiores a 0.50 devido ao aumento considerável do erro associado à medição [Hellier, 2003].

O quadro seguinte reúne alguns valores da emissividade de alguns materiais (vide Anexo A):

Quadro 2.5 - Emissividade de alguns materiais a 0°C [Fluke, 2010]

Material	Emissividade
Alumínio, polido	0.05
Alumínio, fortemente oxidado	0.25
Latão, polido	0.03
Tijolo, comum	0.85
Tijolo, refractário, rugoso	0.94
Bronze, polido	0.1
Ferro fundido, fundição rugosa	0.81
Ferro fundido, polido	0.21
Betão	0.54
Vidro	0.92
Neve	0.8
Água	0.98
Aço, superfície rugosa	0.96
Tinta, óleo, média	0.94
Solo gelado	0.93

A emissividade é um parâmetro com acentuada influência nos resultados obtidos através da termografia de infravermelhos, embora, no caso do estudo térmico apontar para uma análise qualitativa, o valor da emissividade escolhida não é muito importante visto tratar-se de uma análise às diferenças de temperatura superficial, mas mesmo assim, uma selecção cuidada do valor da emissividade poderá simplificar a interpretação da imagem térmica [Barreira *et al.*, 2007].

2.2.1.4. Radiação em corpos reais

De acordo com a Lei de *Kirchoff*, num estado de equilíbrio, a energia radiante emitida por um corpo é igual à energia absorvida, logo, a radiação infravermelha incidente sobre uma superfície é totalmente transmitida, reflectida, ou absorvida.

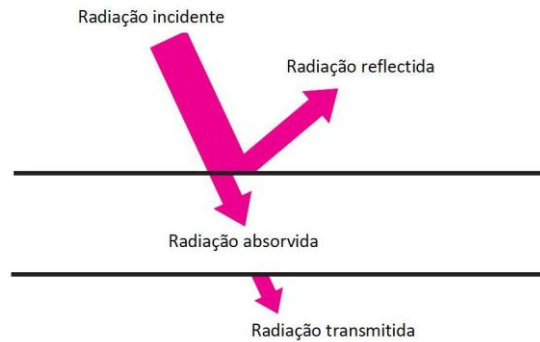


Figura 2.32 - Balanço de energia radiante para um corpo real

Quando a radiação incidente interage com a superfície de um corpo real, parte dela é reflectida (θ) e a restante penetra no corpo, podendo esta última contribuir para uma alteração da temperatura da superfície, dependendo da fracção que é absorvida (α) e da restante transmitida (τ) através da superfície [Incropera *et al.*, 2007].

Assim, e de acordo com a lei da conservação de energia, o balanço de energia radiante ao corpo permite escrever

$$\theta + \alpha + \tau = 1 \quad (2.4)$$

onde:

$$\alpha = \frac{\text{radiação absorvida}}{\text{radiação incidente}}; \quad \theta = \frac{\text{radiação reflectida}}{\text{radiação incidente}}; \quad \tau = \frac{\text{radiação transmitida}}{\text{radiação incidente}}$$

Segundo alguns autores [Pires, 2002; Incropera *et al.*, 2007], a superfície em estudo pode ser classificada em função dos valores destas propriedades, da seguinte forma:

Corpo negro	$\alpha = 1; \theta = \tau = 0$
Corpo opaco	$\tau = 0; \theta + \alpha = 1$
Corpo transparente	$\tau = 1; \theta \approx \alpha \approx 0$
Corpo brilhante	$\theta = 1; \tau \approx \alpha \approx 0$

De acordo com Incropera *et al.* [2007], a classificação de corpo opaco adequa-se à maioria das aplicações em engenharia, passando o processo de absorção e reflexão do corpo a um simples fenómeno superficial. Hellier [2003] afirma que tanto a radiação transmitida como a reflectida pela superfície, não nos revela nada acerca da sua temperatura, e Barreira *et al.* [2007] acrescenta ainda que a reflectividade tem uma maior influência quando se trata de uma superfície com baixa emissividade, pois induz uma maior variação da temperatura superficial.

A radiação absorvida pela superfície pode surgir de variadas fontes situadas na vizinhança do corpo, em que apenas uma porção desta energia é absorvida, mas que contribui para o aumento da energia térmica do corpo. A taxa de energia radiante absorvida pela superfície é definida pela seguinte equação

$$G_{abs} = \alpha \cdot G \quad W.m^{-2} \quad (2.5)$$

sendo a energia absorvida pela superfície (G_{abs} , expressa em $W.m^{-2}$) e o parâmetro α a absorvidade que define a eficiência da superfície a absorver a radiação incidente (G , expressa em $W.m^{-2}$), e que assume valores entre $0 \leq \alpha \leq 1$.

As trocas de energia radiante entre um corpo e a sua vizinhança estão esquematicamente representadas na seguinte figura:

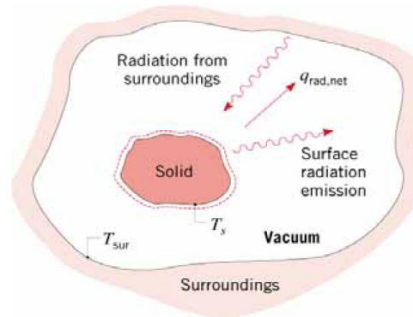


Figura 2.33 -Transferência de calor por radiação [Incropera *et al.*, 2007]

Assim, o fluxo de calor transferido por radiação entre duas superfícies em que uma, a superfície de vizinhança, envolve totalmente a superfície em estudo, pode ser descrito pela diferença entre a energia térmica libertada através da radiação emitida e a radiação absorvida pela superfície:

$$q''_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad W.m^{-2} \quad (2.6)$$

em que o fluxo de calor transferido por radiação (q''_{rad} , expresso em $W.m^{-2}$), apresenta uma relação de proporcionalidade entre as temperaturas da superfície (T_s) e da vizinhança (T_{viz}).

Segundo Hellier [2003], a superfície de um corpo real pode apresentar diversas zonas cujo calor transferido por radiação difere devido à existência de deformações, falhas ou cavidades. A *Lei de Stefan-Boltzmann* pode então ser trabalhada de forma a minimizar o impacto da reflectividade no cálculo da temperatura para materiais opacos, adoptando a seguinte forma:

$$q_{rad} = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (A \cdot \sigma \cdot (1 - \epsilon) \cdot T_{viz}^4) \quad W \quad (2.7)$$

o segundo termo da equação (2.7) representa a fracção da radiação emitida devido à fracção reflectida pelos defeitos existentes na superfície (falhas, cavidades).

Datcu *et al.* [2005] desenvolveram um método para quantificar a radiação reflectida pela vizinhança de um objecto, onde a distância entre a superfície e a câmara é relativamente curta

com o objectivo de minimizar o efeito de absorção da radiação pela atmosfera, mas onde a radiação reflectida assume um valor idêntico ao da radiação emitida pela superfície originando um campo de temperaturas que não corresponde à realidade. A técnica desenvolvida passa pela colocação de um espelho altamente reflectivo e difuso em alumínio numa superfície de emissividade alta (≈ 1), e onde toda a radiação captada no espelho é composta pela radiação reflectida proveniente da vizinhança que se assumiu distribuída aleatoriamente em volta da superfície estudada.

2.2.2. Resistência térmica

Para poder definir a resistência térmica é necessário fazer uma introdução aos modos de transferência de calor envolvidos na sua caracterização, nomeadamente a condução e a convecção.

2.2.2.1. Condução

A transferência de calor por condução ocorre quando a energia térmica é transferida através de um meio sólido ou fluido estacionário, e o mecanismo físico responsável por este modo de transferência deve-se ao movimento e interacção entre partículas elementares (átomos, moléculas ou electrões livres).

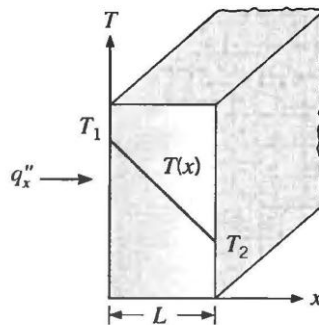


Figura 2.34 - Condução de calor através de uma parede plana [Incropera *et al.*, 2007]

O fluxo de calor transferido por condução (q''_x , expresso em $W.m^{-2}$), segundo a direcção x é quantificado através da *Lei de Fourier*.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad W.m^{-2} \quad (2.8)$$

Como $q''_x = q''_{cond}$, a equação anterior pode ser reescrita como

$$q_{cond} = \frac{k \cdot (T_1 - T_2)}{L \cdot A} \quad W \quad (2.9)$$

onde q_{cond} é o calor transferido por condução e que depende de uma propriedade de transporte do material conhecida como condutividade térmica (k , expressa em $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ou $W.m^{-1}.K^{-1}$), da espessura do material L (medida na direcção do escoamento em m), da área normal ao

escoamento (A , expressa em m^2) e em função do diferencial de temperatura entre as duas faces paralelas da superfície ($\Delta T = T_1 - T_2$, expresso em K ou $^{\circ}C$).

Condutividade térmica

A *Lei de Fourier* é uma expressão construída a partir de ensaios experimentais e define uma importante propriedade do material, a condutividade térmica, definida pela seguinte equação:

$$k = -\frac{q_{cond}}{A \cdot (T_2 - T_1)} \quad W.m^{-1}.K^{-1} \quad (2.10)$$

Tendo em conta que os materiais estudados são isotrópicos é então considerado que o valor da condutividade térmica é independente da direcção do escoamento logo $k_x = k_y = k_z = k$ [Incropera *et al.*, 2007].

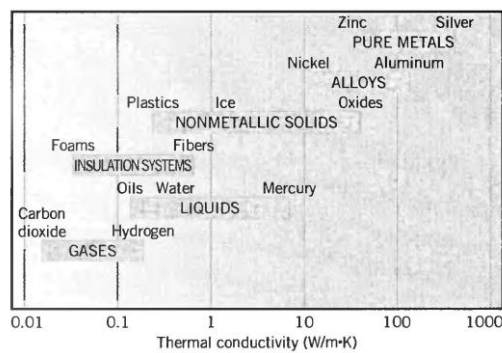


Figura 2.35 - Condutividade térmica de alguns materiais [Incropera *et al.*, 2007]

O fluxo de calor por condução aumenta proporcionalmente com o aumento da condutividade térmica, tal que quanto mais baixo for o valor do parâmetro k mais isolante é o material. Além disso, a condutividade térmica de um material varia em função do seu estado, assim sendo o parâmetro k de um gás é inferior ao de um líquido que, por sua vez, é inferior ao de um sólido.

A diferença de condutividade térmica nos materiais é um dos princípios básicos de muitas aplicações termográficas, principalmente na localização de zonas com isolamento danificado e na avaliação de falhas ou defeitos em materiais compósitos [Hellier, 2003].

2.2.2.2. Convecção

O termo convecção refere-se à transferência de calor que ocorre entre fluidos (gases ou líquidos), ou ainda entre uma superfície e um fluido em movimento sempre que exista uma diferença de temperatura entre ambos. Este modo de transferência de calor resulta da junção de dois mecanismos, o primeiro conhecido por *difusão* resultante do movimento aleatório das moléculas do fluido, o segundo, a *advecção*, resultante do movimento macroscópico do fluido.

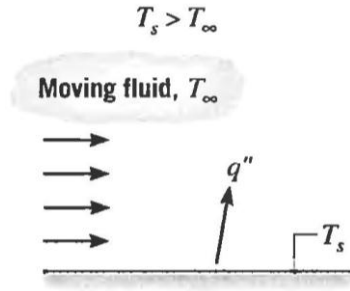


Figura 2.36 – Transferência de calor por convecção [Incropera *et al.*, 2007]

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento, ou seja, convecção natural ou convecção forçada. Designa-se convecção forçada quando o escoamento do fluido é sujeito a meios externos, tais como ventiladores, bombas ou ventos atmosféricos. Quando o movimento do fluido resulta da diferença de densidade causada pelas variações de temperatura, então estamos perante a convecção natural. Em qualquer dos casos, poderão ocorrer dois tipos de escoamento, laminar ou turbulento, existindo entre ambos uma zona de transição [Incropera *et al.*, 2007].

Independentemente da natureza do escoamento, o fluxo de calor por convecção (q''_{conv} , expresso em $W.m^{-2}$) é caracterizado pela *Lei de Arrefecimento de Newton*.

$$q''_{conv} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad W.m^{-2} \quad (2.11)$$

O fluxo de calor por convecção é proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção, parâmetro associado às condições da camada limite, e à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido, T_s e T_∞ respectivamente.

O calor transferido por convecção (q_{conv} , expresso em W) pode ainda ser definido por

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad W \quad (2.12)$$

onde q_{conv} depende directamente do coeficiente de convecção (h , expresso em $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ ou $W.m^{-2}.K^{-1}$), da área normal ao escoamento (A , expressa em m^2) e do diferencial de temperatura entre a superfície e o fluido em movimento ($\Delta T = T_s - T_\infty$, expresso em K ou $^{\circ}C$).

Coeficiente de convecção

O coeficiente de convecção (h , expresso em $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ ou $W.m^{-2}.K^{-1}$) utilizado num estudo termográfico é determinado experimentalmente ou por estimativa, onde o valor exacto depende de diversos factores [Hellier, 2003]:

- Tipo de escoamento (laminar ou turbulento);
- Velocidade do escoamento;
- Viscosidade do fluido;
- Propriedades térmicas e de transporte do fluido;
- Condições da superfície;
- Geometria, orientação e dimensão da superfície.

Para um dado fluido, o coeficiente de convecção aumenta quando se transita de convecção natural para convecção forçada, e para um dado regime de convecção (natural ou forçada) o coeficiente de convecção é, geralmente maior para líquidos do que para gases.

Quadro 2.6 – Valores típicos do coeficiente de convecção [Incropera *et al.*, 2007]

Process	h (W/m ² · K)
Free convection	
Gases	2–25
Liquids	50–1000
Forced convection	
Gases	25–250
Liquids	100–20,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500–100,000

A convecção é um factor importante em termografia, pois em situações de convecção forçada os possíveis defeitos na superfície em estudo poderão ser distorcidos e como consequência os resultados sairão adulterados, e.g., o efeito do vento aumenta o calor transferido através da superfície [Hellier, 2003].

Pires [2002] realizou um trabalho experimental em laboratório onde é estudado o fenómeno da convecção natural sob escoamento laminar em superfícies verticais com dois tipos de configuração, lisa e com nervuras. A obtenção da distribuição de temperatura na superfície foi realizada com recurso à termografia por infravermelhos e de onde se concluiu que a utilização de nervuras aumenta o valor do coeficiente de convecção quanto maior for o fluxo de calor efectivo.

A transferência de calor num corpo está directamente relacionada com a maior, ou menor, resistência do material à passagem do fluxo de calor. Surge assim a definição de resistência térmica (R_t , expressa em $m^2.K.W^{-1}$), como a medida da resistência do material ao fluxo de calor [Incropera *et al.*, 2007].

A resistência térmica para a transferência por condução através de uma parede plana é definida pela seguinte equação:

$$R_{t,cond} = \frac{L}{k} \quad m^2.K.W^{-1} \quad (2.13)$$

Para a transferência de calor por convecção a resistência térmica numa superfície é:

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h} \quad m^2.K.W^{-1} \quad (2.14)$$

A resistência térmica associada às trocas de calor por radiação é definida por:

$$R_{t,rad} = \frac{1}{h_{rad}} \quad m^2.K.W^{-1} \quad (2.15)$$

2.2.3. Coeficiente de transmissão térmica

Para paredes compostas com várias resistências associadas é definido o coeficiente de transmissão térmica global (U , expresso em $W.m^{-2} K^{-1}$), definido pela seguinte equação:

$$U = \frac{1}{R_t} \quad W.m^{-2} K^{-1} \quad (2.16)$$

O valor de U resulta da resistência térmica total entre duas temperaturas de ar separadas por uma parede (simples ou multi-camada).

A resistência térmica e o valor de U são parâmetros que devem ser considerados na termografia por infravermelhos quando aplicada ao estudo da envolvente de edifícios.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Interpretação de Imagens Termográficas

3.1.1. Captação de Imagens Termográficas

A imagem térmica apenas mostra o padrão de temperatura superficial, ou seja, a radiação emitida e a reflectida pela superfície, tornando apenas visíveis os efeitos térmicos causados na superfície pelos elementos construtivos.

A análise e interpretação de resultados provenientes da termografia por infravermelhos são um processo relativamente complexo pois existem algumas variáveis envolvidas que são difíceis de quantificar. Surge assim, a necessidade de efectuar alguns testes preliminares de viabilidade do estudo termográfico de modo a limitar a influência destas variáveis nos resultados. Meola [2007b] desenvolveu uma abordagem teórica para a verificação prévia da aplicabilidade da termografia por infravermelhos na detecção de defeitos inclusos em materiais com o principal objectivo de eliminar a necessidade de realização destes testes preliminares, regra geral dispendiosos em termos de tempo e custos, e concluiu que a detecção de anomalias está dependente de três factores, factor geométrico do defeito, factor térmico do defeito, e factor de detecção/medição do equipamento termográfico.

Tal como foi anteriormente referido, a emissividade da superfície é a variável que maior influência tem no valor da radiação captada pela câmara termográfica e deste modo a sua definição deve ser objecto de algum cuidado. Barreira [2004] apresenta no seu trabalho um catálogo de emissividades relativamente completo. Devido à relevância deste parâmetro é também apresentado no Anexo A uma tabela de emissividades.

A reflectividade da superfície também apresenta uma influência significativa especialmente quando se trata de uma superfície de baixa emissividade pois induz uma maior variação da temperatura superficial devido à reflexão térmica [Barreira, 2004; Barreira *et al.*, 2007].

A reflexão de uma fonte pontual situada na vizinhança pode assim induzir um erro na medição e conduzir a uma avaliação incorrecta da envolvente analisada. Este fenómeno é facilmente detectado sempre que o ângulo de incidência for igual ao ângulo de reflexão (ou emergente) e o ponto quente se mover quando o equipamento for movimentado. Outro método de identificação de reflexos passa pela análise do gradiente térmico, existente apenas na situação de aquecimento real.

A absorção da radiação infravermelha pela atmosfera afecta os valores recolhidos [Barreira, 2004], especialmente quando a distância de medição for superior a 10 metros, facto que demonstra a importância do comprimento de onda a captar.

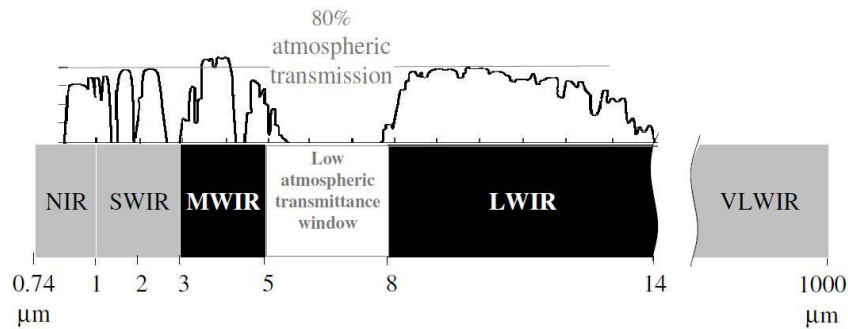


Figura 3.1 - Intervalos de captação de radiação infravermelha [Ibarra-Castanedo *et al.*, 2007]

A cor da superfície, embora não afecte a emissividade, tem maior influência quando as diferenças de temperatura são mais acentuadas [Barreira *et al.*, 2007], e pode afectar a absorção da radiação solar pela envolvente provocando o aumento da temperatura superficial.

A variação das condições climáticas (temperatura e humidade relativa) tem um grande impacto nas alterações registadas em imagens térmicas especialmente devido à evaporação superficial ser bastante sensível a estas variáveis climáticas [Barreira, 2004].

Existem ainda outros factores que poderão causar distorções na medição da temperatura superficial através da termografia por infravermelhos, nomeadamente;

- Temperatura ambiente;
- Temperatura da vizinhança;
- Humidade relativa;
- Infiltração ou presença de água, chuva;
- Impacto do sol e outras fontes de calor;
- Velocidade do vento ou outros factores que influenciam a convecção;
- Efeito chaminé e sombreamentos;
- Ângulo de captação;
- Distância de medição;
- Existência de obstáculos entre a câmara e a superfície (vegetação, árvores, objectos);

O vento é um factor que afecta directamente a convecção de calor na superfície da envolvente, assim num dia de vento, a melhor imagem térmica ocorre quando o gradiente térmico é significativo, ou seja, acima dos 14°C, embora não seja recomendado a recolha de imagens sempre que a velocidade do vento exceda os 32km.h⁻¹ [Lo *et al.*, 2004].

Para uma avaliação quantitativa, e de acordo com o trabalho de Jaworski [2008], o equipamento de termografia por infravermelhos deve ter como intervalo de captação um comprimento de onda compreendido entre 8μm e 14μm, e apresentar uma resolução térmica na ordem dos 0.05K (à temperatura de 273.15K). Tendo em conta que neste tipo de avaliações o gradiente térmico é significativamente pequeno, o intervalo de medição de temperatura do equipamento deve ser limitado, entre 253K e 373K, devendo compreender a temperatura ambiente com a possibilidade de subdivisão em pequenos intervalos.

A cada ponto ou *pixel* (*picture element*) da imagem térmica corresponde uma área específica da superfície cujo valor varia em função da distância entre o equipamento e a superfície em estudo. Com o aumento da distância, aumenta a dimensão mínima detectável (*IFoV-Instantaneous Field of View*), fazendo com que o campo de captação (*FOV - Field of View*) tenha uma área maior distribuída por cada pixel. Assim, a escolha da distância a realizar o estudo é um parâmetro a ter em atenção pois radiação captada nessa área é uma média da radiação real emitida, o que traduz uma perda de detalhe da imagem.

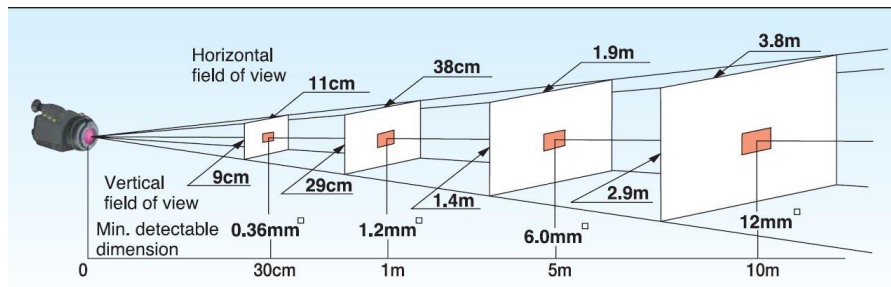


Figura 3.2 - Resolução da imagem térmica e área captada [Nec/Avio, 2009]

3.1.2. Reconhecimento de Imagem

A imagem térmica, de modo similar às imagens digitais, é constituída por elementos discretos ou *pixel* (*picture element*) e o seu processo de amostragem assume duas representações distintas; a primeira, a amostragem espacial é uma função de duas variáveis espaciais $f(x,y)$, onde o valor da função f numa determinada posição (x,y) representa a intensidade da imagem nesse ponto ou *pixel*; a segunda, a amostragem de amplitude ou intensidade onde cada ponto é representado por um número que traduz os níveis de cinzento (intensidade luminosa global). Nas imagens a cores cada ponto é representado por três valores inteiros referentes a cada uma das componentes de cor primária (Vermelho/Verde/Azul, ou seja, sistema *RGB - Red/Green/Blue*) [Gonzalez *et al.*, 2008; Mathworks, 2010].

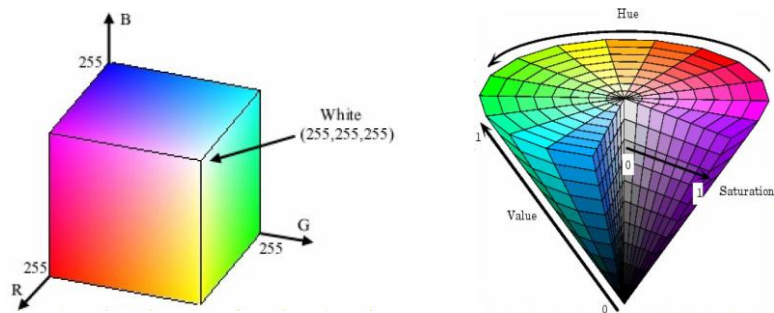


Figura 3.3 – Sistema RGB e HSV [Mathworks, 2010]

O sistema *RGB* é o sistema base do olho humano e é o utilizado em monitores e televisores. Tendo em conta que o olho humano é mais sensível ao verde, a conversão aproximada para níveis de cinzento é determinada através da seguinte proporção:

$$I = 0.3 R + 0.59 G + 0.11 B \quad (3.1)$$

O espaço de cor apropriado para a segmentação de cor é o *HSV* (*Hue* (tom), *Saturation* (saturação), *Value* (valor)). Existem ainda outros espaços de cor que são utilizados para variados tipos de representação, assim como os diferentes formatos de armazenamento e compressão de imagem são descritos em pormenor na bibliografia [Gonzalez *et al.*, 2004; Gonzalez *et al.*, 2008].

As imagens térmicas são representações da temperatura superficial onde a cada valor de temperatura é associada uma determinada cor atribuída de acordo com a paleta de cores escolhida pelo utilizador. O valor da temperatura é obtido por um processo interno ao equipamento que converte a radiação captada no sensor em sinal eléctrico que por sua vez é amplificado e utilizado para o cálculo da temperatura, utilizando para tal a emissividade e alguns parâmetros de correcção, sendo posteriormente armazenado em ficheiro próprio. Assim, à imagem térmica deverá vir sempre associado um ficheiro com as temperaturas de cada ponto, caso contrário, a imagem térmica servirá apenas para fins qualitativos. Sempre que a análise da imagem térmica for realizada no respectivo software do equipamento, a informação das temperaturas é acedida automaticamente pois é parte integrante dos dados armazenados.

3.1.3. Tratamento e Análise de Informação

A manipulação da imagem térmica através da aplicação de diversas técnicas de processamento tornou-se necessária devido à imensa informação contida numa imagem, assim, o pré-processamento e processamento da imagem torna-se importante, pois a imagem recolhida apresenta uma série de erros associados à sua captação e a sua utilização sem qualquer tipo de tratamento é desaconselhada, sobretudo, quando o objectivo passa por uma análise quantitativa, como a detecção de anomalias e a sua caracterização.

O processamento de baixo nível passa por operações simples como mudar a intensidade global da imagem ou estabelecer relações básicas entre pixéis, através da aplicação de filtros de convolução, detecção de pontos isolados, detecção de arestas, limitação e binarização, ou de técnicas de realce e suavização [Gonzalez *et al.*, 2004; Gonzalez *et al.*, 2008].

Ibarra-Castenedo *et al.*[2004] apresentam um trabalho resumo onde reúnem as várias técnicas de análise para o pré-tratamento de imagens térmicas, das quais se destaca o realce do pixel (*pixel enhancement*), cujo método consiste na substituição do valor de um dado pixel por um outro dependente de uma relação não linear estabelecida por computação numérica, regra geral, aplicando técnicas para adaptação ou compensação face a alterações de iluminação da cena (histograma de uma imagem).

Relativamente à fase de processamento, a técnica de limitação (*thresholding*) é a mais utilizada em Visão Artificial e muito comum na análise quantitativa e detecção de defeitos [Ibarra-Castenedo *et al.*, 2004]. Esta técnica resume-se a um processo de redução dos níveis de cinzento de uma imagem, geralmente para dois níveis - imagem binária. A limitação binária ou binarização é a primeira operação utilizada para destacar o objecto da vizinhança pois conjuga através de

métodos diferenciais a imagem binária com diversos operadores, dos quais se destacam, gradiente para arestas, *Sobel*, *Prewitt*, *Roberts*, Laplaciano, Laplaciano da Gaussiana. Outro popular operador para detecção de arestas é o Método de *Canny* que combina a Convolução Gaussiana com o Filtro de *Roberts* [Gonzalez et al., 2008; Mathworks, 2010].

O processamento de nível médio contempla uma série de operações morfológicas (dilatação, erosão, fecho e abertura) para detecção de padrão na imagem binária, lidando com partes da imagem dividida em objectos (*features*) e fundo (*background*). Estes e outros operadores morfológicos são apresentados com mais detalhe na bibliografia [Gonzalez et al., 2004; Gonzalez et al., 2008; Mathworks, 2010].

Do processamento efectuado nas fases anteriores resulta então a segmentação da imagem, que simplesmente é o processo de divisão da imagem em partes correlacionadas com os objectos e áreas do mundo real captados. Na sua maioria, os algoritmos de segmentação baseiam-se na descontinuidade ou similaridade entre as características dos pixéis da imagem tais como pontos, arestas e linhas. Abdel-Qader et al. [2008] desenvolveram um algoritmo baseado na segmentação da imagem térmica para a construção de regiões através da detecção de pontos quentes. Este algoritmo foi aplicado em imagens térmicas obtidas através de termografia activa para a detecção e análise de defeitos em estruturas de pontes de betão. Datcu et al. [2005] aplicaram no seu trabalho um procedimento de segmentação de imagem baseado no filtro de *Canny* de modo a obter a estimativa da temperatura da vizinhança através da extracção precisa da região que define a superfície do espelho na imagem térmica.

Existem vários softwares dedicados ao tratamento e análise de imagens térmicas, embora na sua maioria são programas proprietários dos fabricantes de equipamentos de termografia destinados ao processamento de informação proveniente dos seus equipamentos. A variedade de funções básicas de visualização, manipulação dos mapas de cor e a localização de regiões de interesse na imagem são ferramentas usuais nestas aplicações. Dos vários softwares proprietários existentes no mercado destacam-se os seguintes pela sua aplicabilidade no estudo dos edifícios.

O *Fluke SmartView*® é um programa proprietário destinado à elaboração de relatórios e análise de imagens apenas provenientes dos equipamentos termográficos *Fluke*®. Além das várias ferramentas de visualização, edição e análise de imagens térmicas, é também abordada a visualização a três dimensões das mesmas e a fusão da imagem térmica com a imagem real [Fluke, 2010].

O software *FLIR BuildIR*® é outro programa proprietário dedicado especialmente à análise de imagens térmicas de edifícios, onde além das habituais ferramentas de básicas, poderão ser detectados problemas de humidade, deficiências no isolamento térmico, infiltrações de ar e proceder à elaboração do respectivo relatório em conjunto com a estimativa dos custos e poupanças anuais com energia. Nesta aplicação foi ainda desenvolvida uma ferramenta que permite estimar os valores da resistência térmica e do coeficiente de transmissão térmica através do método desenvolvido por Madding [2008] [Flir Systems, 2010a].

Relativamente a programas livres surge o *IR-View* na linguagem *Matlab*® desenvolvido na Universidade de *Laval* no Canadá por uma equipa liderada por *Xavier Maldague*, cuja aplicação é orientada para a análise de imagens térmicas provenientes de ensaios não destrutivos com termografia activa. Visto ser uma aplicação livre e editável, de acordo com os termos legais da licença, pode ser adaptada e servir de base para inúmeras aplicações [Klein *et al.*, 2008].

Outras aplicações em *Matlab*® e *Labview*® têm sido desenvolvidas por diversos investigadores para tratar e analisar as imagens térmicas decorrentes das suas investigações, mas onde serão sempre limitadas noutras aplicações devido à sua especificidade.

No trabalho realizado por Branco [2008] onde é apresentado um método inverso de cálculo da resistência térmica, foi identificada a necessidade de desenvolver uma aplicação numa linguagem de programação simples mas poderosa e enquadrada com a ferramenta desenvolvida para o cálculo da resistência térmica, na qual o processamento e análise de imagens térmicas da envolvente de edifícios, com especial destaque à envolvente vertical, fossem realizados de forma automática ou com o mínimo de intervenção por parte de um utilizador menos experiente, em que os resultados alcançados seriam, por sua vez, os valores de entrada à ferramenta previamente desenvolvida. Deste trabalho resultou a aplicação supra citada.

3.2. Termografia e Edifícios

A solicitação higratérmica a que está sujeita a envolvente de um edifício, condiciona a sua qualidade, e só a satisfação de um conjunto de exigências construtivas permite obter um comportamento adequado da envolvente.

Tipicamente, as perdas de energia pela envolvente ocorrem maioritariamente através da cobertura 40%, mas onde cerca de 25% é perdida pelas paredes e 15% através dos envidraçados. Já as infiltrações de ar pelas portas e janelas correspondem a 10% e finalmente as perdas pelo solo perfazem 10%.

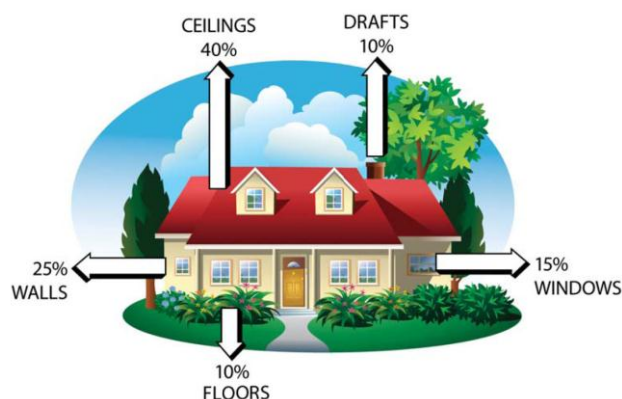


Figura 3.4 – Perdas pela envolvente em habitações

[Electrophysics
Resource Center, 2009]

No sector da Construção, a termografia por infravermelhos tem sido utilizada para investigar aspectos relacionados com os elementos que fazem a separação entre o interior e o exterior do edifício [Lo *et al.*, 2004], ou na análise do comportamento higratérmico de diversos materiais de construção [Barreira, 2004; Barreira *et al.*, 2007].

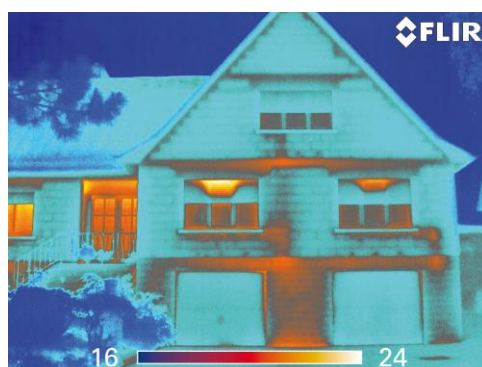


Figura 3.5 - Imagem térmica de uma habitação [Flir Systems, 2010a]

A grande maioria das inspecções termográficas visam questões relacionadas com a conservação de energia e qualidade do ar interior [Balaras *et al.*, 2002; Al-Kassir *et al.*, 2005]. A termografia por infravermelhos é tipicamente aplicada aos edifícios considerando os objectos num estado termicamente estacionário, e onde apenas se comparam as amplitudes das temperaturas registadas nos vários pontos da envolvente, ou seja, é efectuada a análise qualitativa da envolvente.

A análise qualitativa conjugada com a termografia passiva tem sido aplicada na detecção de defeitos em fachadas de edifícios revestidas a azulejos, causados por azulejos descolados do substrato onde ocorre a infiltração de humidade, água e ar [Li *et al.*, 2000], na avaliação não destrutiva de diversos edifícios [Titman, 2001], monitorização de edifícios históricos [Grinzato *et al.*, 2002], análise da performance térmica de edifícios rurais em Espanha [Ocaña *et al.*, 2004], avaliação de sistemas de drenagem de água em edifícios históricos [Tavukcuoglu *et al.*, 2005; Tavukcuoglu *et al.*, 2007], avaliação de desempenho da envolvente de grandes edifícios públicos

com análise apenas pelo exterior [Woerner *et al.*, 2006], detecção de infiltrações de ar pela envolvente de edifícios [Suonketo *et al.*, 2009].

Esta última abordagem, conjugada com outras técnicas não destrutivas, foi aplicada com sucesso na avaliação do nível de isolamento térmico em edifícios [Haralambopoulos *et al.*, 1998], ou ainda, na avaliação de diversos edifícios históricos [Binda *et al.*, 2009].

A abordagem quantitativa surge a um nível mais avançado na avaliação da envolvente de edifícios, onde a análise do fluxo de calor transferido através da envolvente leva à resolução de um problema inverso de condução de calor em regime transiente. Esta abordagem implica, não apenas o registo da temperatura da superfície, mas também da sua evolução ao longo do tempo. O presente trabalho vem tentar dar a sua contribuição para a evolução da abordagem quantitativa passiva que sendo uma técnica emergente carece de investigação.

A aplicação quantitativa tem sido utilizada na avaliação e detecção de defeitos na envolvente de edifícios, como por exemplo, laminação ou separação do reboco, anomalias no isolamento, pontes térmicas e presença de humidade [Grinzato *et al.*, 1998], avaliação de infiltrações de ar pela envolvente de edifícios [Kalamees, 2007], determinação do coeficiente de transmissão térmica, performance e permeabilidade térmica da envolvente [Jaworski, 2008], avaliação de pontes térmicas [Wróbel *et al.*, 2008], avaliação experimental da envolvente térmica e determinação da resistência térmica [Kisilewicz *et al.*, 2010].

O diagnóstico não destrutivo de defeitos com recurso à termografia activa tem sido alvo de estudo por diversos autores, nomeadamente em, defeitos causados pelo aparecimento de fendas em estruturas em betão através da termografia modelada ou *Lock-in* [Sakagami *et al.*, 2002], avaliação quantitativa de defeitos em edifícios [Maierhofer *et al.*, 2004], caracterização de materiais [Meola *et al.*, 2004], avaliação de estruturas em betão [Maierhofer *et al.*, 2006], influência das propriedades do betão na detecção de defeitos [Maierhofer *et al.*, 2007; Maierhofer *et al.*, 2009b], estudo de estruturas em alvenaria [Meola, 2007a], detecção de inclusões metálicas em placas de gesso e respectivos parâmetros térmicos [Silva, 2007], detecção de defeitos no isolamento térmico de edifícios [Candoré *et al.*, 2008], avaliação de placas de isolamento revestidas com reboco e com poliestireno expandido [Youcef *et al.*, 2008], estruturas históricas em alvenaria [Maierhofer *et al.*, 2009a], determinação da resistência térmica em edifícios históricos [Youcef *et al.*, 2010], análise térmica de uma solução composta de tijolo e poliestireno expandido [Sales *et al.*, 2010].

A combinação da termografia activa com a técnica do ultra-som foi avaliada no estudo da distribuição de humidade e surgimento de fendas em reboco nos laboratórios do LNEC [Pina Santos *et al.*, 2002].

3.3. Isolamento Térmico

O isolamento térmico consiste na combinação de vários materiais e produtos de baixa condutividade térmica cujo valor de cada elemento deverá ser inferior a $0.065 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e apresentar uma resistência térmica superior a $0.30 \text{ m}^2.\text{°C.W}^{-1}$.

Aplicação da termografia em construções novas durante a fase de acabamentos finais, ou antes de serem habitadas, é muito vantajosa pois pode detectar falhas e anomalias na aplicação do isolamento que poderão ser facilmente corrigidas com custos inferiores aos que seriam necessários numa fase posterior em que a habitação já se encontra habitada e com outras patologias associadas devido a essa falha. Relembrando que em Portugal o construtor tem de garantir durante 5 anos, e mediante um uso correcto da habitação, o bom estado de conservação da construção. Além disso, a termografia pode ser uma ferramenta muito útil para verificar o grau de sucesso de medidas de correcção de isolamentos que foram entretanto aplicadas.

Embora existam actualmente duas normas internacionais que contextualizam a aplicação da termografia por infravermelhos no estudo do isolamento térmico de edifícios, a EN 13187:1999 e a ASTM C1060-90, não existe um protocolo universal definido para a inspecção pelo exterior da envolvente de edifícios com recurso a câmaras termográficas. Ambos os documentos descrevem as variáveis fundamentais que afectam a inspecção de edifícios através da termografia e sugerem quais as variáveis a registar de modo a assegurar que as imagens obtidas possam ser interpretadas por vários especialistas e obter conclusões semelhantes.

A norma americana ASTM C 1060-90 (revista em 2003) (*Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*) está orientada para o estudo qualitativo da envolvente de edifícios pré-fabricados cujas estruturas são em madeira ou metal, saindo fora do padrão construtivo português (alvenaria, etc.), sendo apenas avaliado qualitativamente o isolamento térmico ou a falta dele. A análise a infiltrações de ar, acumulação de humidade e medição do valor de R_t , encontram-se fora do campo de actuação da norma. A aplicação da norma requer uma velocidade do vento no local da avaliação inferior a 6.7 m.s^{-1} , que a superfície exterior da envolvente a avaliar se encontre seca, e durante o período de 4 horas que antecede a avaliação, a temperatura mínima entre as duas superfícies da envolvente em estudo seja sempre superior a 10°C . Apesar das limitações de aplicabilidade, a norma americana providencia uma introdução às variáveis que poderão afectar a avaliação por infravermelhos à envolvente de edifícios, identificando a documentação necessária para proceder a uma inspecção termográfica correcta e credível [Woerner *et al.*, 2006].

A norma europeia EN 13187:1998 (*Thermal performance of buildings - Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes – Infrared Method*) é muito mais abrangente e rigorosa que a congénere americana, pois além de incluir a inspecção a infiltrações de ar e acumulação de humidade, obriga a uma documentação mais detalhada da inspecção, exigindo por exemplo, o registo da temperatura do ar durante as 24 horas que antecedem a inspecção, a pressão do ar no interior de cada piso do edifício avaliado e a quantidade de radiação solar incidente nas 12 horas antecedentes à avaliação. Esta norma está direccionada para as condições

verificadas no Norte da Europa, em particular para os países Escandinavos, revelando-se desenquadrada com as necessidades verificadas em inspecções em climas moderados. Requer ainda que, preferencialmente, a inspecção ocorra perante condições estacionárias, como por exemplo, a inexistência de radiação solar incidente directamente no edifício, tanto durante, tal como nas 12 horas precedentes à inspecção, assim como uma variação máxima de 5°C na temperatura do ar no exterior durante o teste [Woerner *et al.*, 2006].

Haralambopoulos *et al.* [1998] apresentam uma metodologia que consiste na aplicação qualitativa da termografia à envolvente do edifício, cujo aquecimento foi previamente ligado, para obter o campo de temperaturas e localizar as irregularidades térmicas planas na envolvente, onde posteriormente, será efectuada a medição pontual da resistência térmica. A conjugação dos resultados das duas técnicas permite estimar o nível de isolamento térmico da envolvente do edifício. A aplicação desta metodologia implica o acesso às zonas onde foram detectadas as irregularidades térmicas, que em função da configuração do edifício em estudo poderá aumentar a complexidade do acesso ao ponto de medição. A necessidade em aceder fisicamente às zonas danificadas e o recurso a vários equipamentos torna este método moroso e dispendioso.

Grinzato *et al.* [1998] realizaram uma simulação numérica da aplicação da irradiação solar no estudo do isolamento térmico da envolvente que serviu de preparação para um trabalho experimental baseado na solução de um problema inverso de transferência de calor. O processamento das imagens térmicas foi efectuada através do programa “Termidge” desenvolvido na *Tomsk Polytechnic University*.

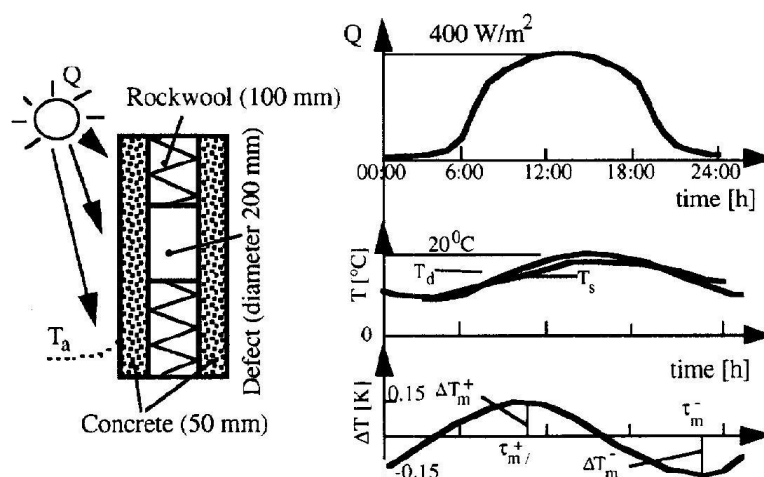


Figura 3.6 – Aplicação da irradiação solar no estudo do isolamento térmico [Grinzato *et al.*, 1998]

A análise quantitativa através da termografia passiva aplicada ao estudo do isolamento térmico de edifícios, apresenta a desvantagem de ser necessário proceder à correcção da imagem térmica para obter a temperatura real, devido sobretudo à influência de diversos factores (emissividade da superfície, fluxo de calor proveniente da vizinhança e reflectido na superfície, e coeficiente de transmissão atmosférica). A estimativa das perdas de calor pela envolvente mesmo quando estes parâmetros são cuidadosamente definidos, revela uma incerteza relevante num diagnóstico que pretende ser preciso [Candoré *et al.*, 2008].

3.4.Detecção e quantificação de pontes térmicas

A transferência de calor apenas pode ser considerada unidimensional nas zonas da envolvente do edifício que apresentem uma superfície plana com estrutura interna contínua, e cuja área ultrapasse significativamente a espessura da parede. Todas as zonas da envolvente que não cumpram os requisitos anteriores são designadas de pontes térmicas e o escoamento do fluxo de calor é considerado multidimensional. As pontes térmicas estão associadas a heterogeneidades (estruturais ou geométricas) existentes na envolvente do edifício, cujos exemplos mais comuns são:

- Transição entre materiais com diferente condutividade térmica;
- Alterações da espessura de um elemento;
- Diferenças entre áreas internas e externas;
- Entre ligações de elementos (nomeadamente, parede/tecto, parede/pavimento).

De acordo com o RCCTE [2006], as pontes térmicas são classificadas como:

- Pontes térmicas lineares;
- Pontes térmicas planas.

No processo de certificação energética de um edifício existente, a existência/inexistência de pontes térmicas planas pode ser garantida com a aplicação da termografia de acordo com o método descrito pela norma EN 13187:1998 [Adene, 2010]. Num termograma, as pontes térmicas podem ser identificadas através das diferenças de temperatura superficial com a forma do componente com menor resistência térmica.

A avaliação quantitativa de pontes térmicas em edifícios existentes foi estudada [Wróbel *et al.*, 2008], onde foram conjugados os resultados obtidos na imagem térmica com a simulação computacional do escoamento multidimensional do calor pela envolvente do edifício. A simulação computacional foi realizada com recurso a um programa desenvolvido para o efeito, e foram avaliadas três tipos de pontes térmicas,

- Ponte térmica plana – pilar e viga inseridos na envolvente;
- Ponte térmica linear – ligação da fachada com a cobertura inclinada;
- Ponte térmica linear – ligação da fachada com pavimentos térreos.

Na *Figura 3.7* é apresentada a avaliação da ponte térmica plana, imagem térmica exterior, interior e simulação computacional:

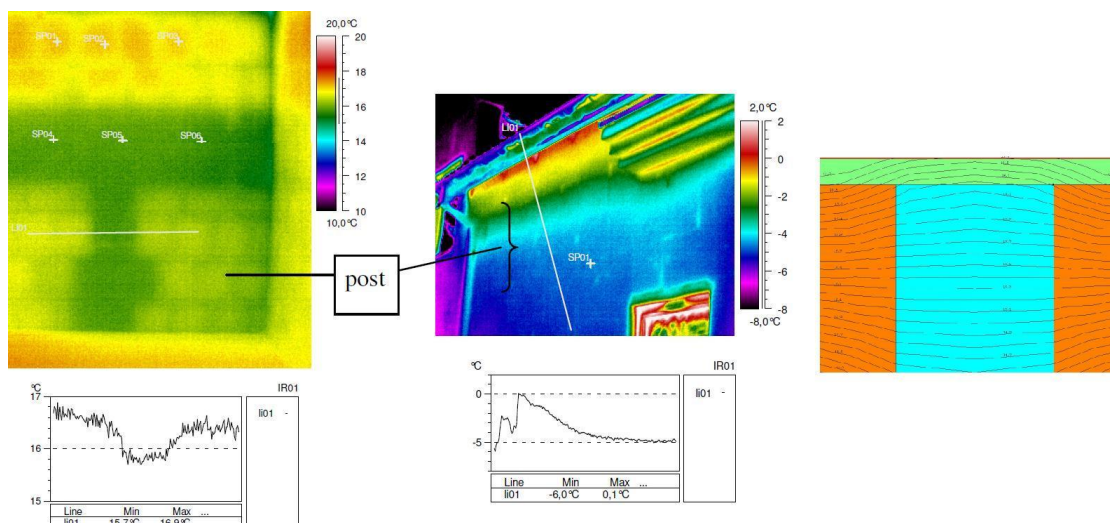


Figura 3.7 – Ponte térmica plana – pilar/viga [Wróbel *et al.*, 2008]

Para as pontes térmicas avaliadas, é fundamental proceder à recolha das imagens térmicas pelo interior e exterior da envolvente de modo a obter uma avaliação quantitativa correcta. É também importante proceder ao registo simultâneo das temperaturas do ar envolvidas e seleccionar cuidadosamente o período de inspecção termográfica, pois as condições ambientais têm uma influência significativa nas medições efectuadas. A simulação computacional, conjugada com a termografia por infravermelhos, alarga as condições limite da avaliação, pois poderão ser simuladas variadas condições ambiente, além da informação recolhida através da inspecção termográfica poder ser aplicada na avaliação quantitativa das perdas térmicas pela envolvente de edifícios.

Atendendo à impossibilidade da eliminação completa da presença de pontes térmicas na envolvente, apenas a sua influência no desempenho térmico da envolvente poderá ser limitada. Assim sendo, é limitado o aumento das perdas de calor e a diminuição da temperatura da superfície interna da envolvente, que provoca a condensação local do vapor de água, que por sua vez, potencializa o desenvolvimento de fungos que contaminarão o ar interior do edifício.

3.5. Identificação de Anomalias

A redução da durabilidade e a degradação da performance das paredes dos edifícios deve-se sobretudo à presença de humidade, ao surgimento de fendas, desagregação do revestimento.

Pina Santos *et al.* [2002] realizaram um estudo experimental no *LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, em que o objectivo principal consistiu na obtenção de informação fundamental sobre as potencialidades da aplicação de técnicas não destrutivas, nomeadamente, a termografia por infravermelhos e o ultra-som, como técnica de avaliação do comportamento de uma parede em blocos de betão furado sujeita a condições climáticas extremas (temperatura e precipitação). Com este trabalho, ficou provado que sob condições controladas de laboratório a termografia por infravermelhos é uma técnica não destrutiva de elevada utilidade, quer na

detecção de falhas e zonas danificadas no revestimento de paredes, quer na detecção da presença e distribuição da humidade, porém a existência de um teor de água relativamente baixo limita significativamente a sua detecção.

Barreira [2004] estudou a aplicação da termografia por infravermelhos na análise do comportamento higrotérmico dos edifícios, onde verificou os factores que influenciam a medição da radiação térmica emitida pela superfície da envolvente, e analisou o processo de humidificação e secagem de alguns materiais de construção. Daqui concluiu que a termografia não pode ser aplicada ao estudo da transferência de humidade no domínio higroscópio pois as trocas de calor existentes à superfície são de tal forma lentas que as diferenças de temperatura verificadas são pouco significativas impossibilitando a sua visualização no equipamento termográfico.

Por sua vez, durante o período de evaporação a humidade é uma das patologias mais fáceis de detectar através da câmara termográfica pois, normalmente este tipo de patologia apresenta uma diferença de temperaturas de 3 a 5 °C entre a zona afectada e a restante envolvente, onde o gradiente térmico é facilmente detectável devido à resolução do equipamento ser inferior a 1 °C [Barreira *et al.*, 2007]. Na Figura 3.8, as condensações são facilmente identificadas, pois, apresentam uma assinatura térmica inferior à da restante envolvente.

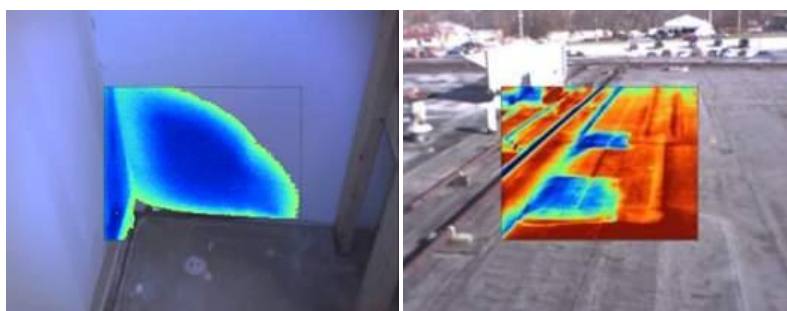


Figura 3.8 – Parede e cobertura com humidade [Fluke, 2010]

Uma nova abordagem para estimar as dimensões de falhas e infiltrações de ar na envolvente de edifícios é apresentada por Dufour *et al.*[2009], onde foram desenvolvidos dois métodos de processamento de imagem para analisar as imagens termográficas realizadas durante um teste de despressurização em laboratório. O primeiro método consiste numa técnica de detecção de arestas para falhas com espessura acima de 4 mm, e um segundo para falhas de espessura menor, baseado na correlação de duas características do processamento de imagem. A aplicação desta abordagem implica o conhecimento prévio da velocidade e temperatura do fluxo de ar que atravessa cada falha analisada.

3.6.Determinação do coeficiente de transmissão térmica

A determinação do valor exacto do coeficiente de transmissão térmica U , através da termografia por infravermelhos quando aplicada no exterior não é recomendada por alguns autores [Titman, 2001], mesmo quando é conhecido o valor preciso das temperaturas envolvidas, devido sobretudo à influência de factores como fugas em juntas, janelas e portas, e as condições

atmosféricas presentes no exterior. No entanto, a termografia pode ser aplicada qualitativamente na detecção de variações do coeficiente de transmissão térmica, ou seja, áreas mal dimensionadas, danificadas ou com falta de isolamento térmico que irão alterar localmente o coeficiente de transmissão térmica da envolvente.

Jaworski [2008] utiliza, no seu trabalho, a termografia por infravermelhos na análise quantitativa das perdas de calor pela envolvente e na avaliação da eficiência térmica de edifícios. Neste trabalho são determinados vários parâmetros, tais como: o coeficiente de transmissão térmica global, a eficiência térmica do edifício e a permeabilidade térmica da envolvente do edifício. É verificada a interligação destas variáveis com o coeficiente de transferência de calor na superfície da envolvente do edifício, assim como a dependência directa da dissipação de calor pela envolvente com a resistência térmica, espessura e capacidade térmica da parede. Os valores do coeficiente de transferência de calor h das superfícies interna e externa da parede definidos neste trabalho para a estimativa do U foram os seguintes:

Quadro 3.1 – Valores de h aplicados à envolvente de edifícios [Jaworski, 2008]

Zona	h ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
Exterior (sem vento)	14
Exterior (com vento)	30
Interior	7.8 a 11.4

A estimativa do valor da resistência térmica de paredes exteriores com base em imagens termográficas e no conhecimento das temperaturas interior, superfície da parede, exterior e reflectida, assim como o valor da emissividade da parede foi estudado por Madding [2008]. O método desenvolvido apenas se aplica a imagens térmicas captadas pelo interior do edifício de modo a obter a temperatura superficial interior da parede, e aplicável em condições quase estáticas para gradientes térmicos superiores a 10°C .

A ADENE refere que no processo de certificação energética de edifícios existentes, o perito qualificado poderá recorrer a métodos de medição *in-situ* de determinação da resistência térmica, onde poderá ser aplicado o método do fluxímetro descrito pela norma ISO 9869 combinado com a aplicação qualitativa da termografia, cujo método se encontra descrito na norma EN 13187. Ribeiro [2009] aplicou o método do fluxímetro para verificar a correspondência entre os valores do coeficiente de transmissão térmica de paredes exteriores de edifícios de habitação medidos *in-situ* e os valores calculados na fase de projecto. Os ensaios *in-situ* foram realizados em habitações na cidade de Vila Real, onde a termografia foi utilizada para determinar as localizações das zonas a ensaiar. Os resultados alcançados comprovam que, mesmo com a necessidade de tratamento cuidadoso dos dados obtidos e a execução morosa dos testes, é possível obter por este método a correspondência entre os valores medidos e os definidos na fase de projecto.

4. Sistema Integrado de captação, interpretação e análise de Imagens Termográficas

4.1. Enquadramento com o modelo matemático

Como foi referido anteriormente, um dos objectivos deste trabalho foi o de desenvolver uma aplicação para a análise automática de imagens captadas na gama do infravermelho recorrendo a uma série de técnicas de análise e diagnóstico de imagens, permitindo assim que um utilizador menos experiente possa identificar patologias e ineficiências nos edifícios analisados. Além da análise da imagem térmica, a ferramenta desenvolvida foi enquadrada com a aplicação apresentada por Branco [2008], onde é efectuado o cálculo da resistência térmica por métodos inversos.

De modo a enquadrar as aplicações desenvolvidas é apresentada esquematicamente na Figura 4.1 o diagrama das etapas de um estudo termográfico.

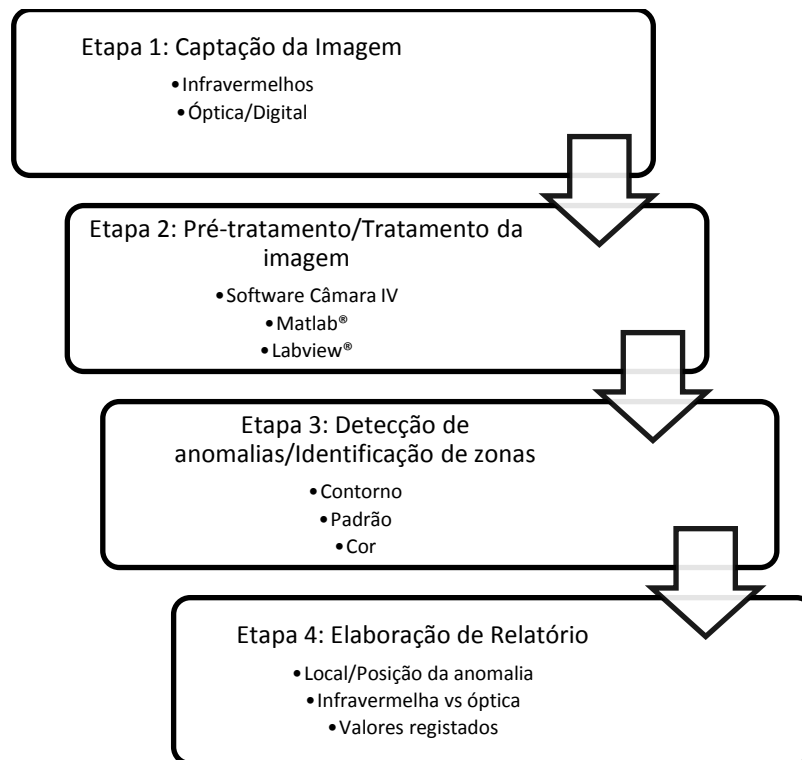


Figura 4.1 – Diagrama geral de um ensaio termográfico

Neste trabalho, a captação da imagem térmica e o pré-tratamento dos dados realizou-se com recurso ao software do equipamento de termografia, e no desenvolvimento dos módulos de análise de imagem e na detecção de anomalias e identificação de zonas foi utilizado o software *MatLab*®. Finalmente foi desenvolvido um módulo que aborda o tratamento da imagem, que inicialmente estava previsto ser em *Labview*®, mas que acabou também por ser realizada em *MatLab*® devido à fácil interligação dos módulos desenvolvidos. As aplicações aqui apresentadas encontram-se enquadradas nas etapas 2 e 3 do diagrama geral.

Foram desenvolvidas duas abordagens distintas para a análise da informação contida no ficheiro gerado pela câmara de infravermelhos, baseando-se nas opções de exportação dos dados, ou como uma imagem digital a cores idêntica à imagem térmica, ou para uma folha de cálculo com as temperaturas detectadas:

Abordagem Imagem Digital

Foi efectuada a análise da imagem térmica com recurso a variadas técnicas de processamento de imagem e a subsequente detecção de zonas através das diferenças de cor existentes, obtendo-se posteriormente a área real e a temperatura média superficial de cada zona/defeito, sendo estas calculadas recorrendo à conjugação da sua localização na imagem térmica com a matriz de temperatura superficial extraída da imagem, utilizando o software do equipamento (*NEC/AVIO®-TH9100MLN*);

Abordagem Matriz Temperaturas

Aqui foi abordada apenas a matriz de temperatura superficial de modo a encontrar as diversas zonas de interesse e respectivas propriedades (área, temperatura superficial média e emissividade) com base em intervalos de temperatura definidos pelo utilizador, obtendo-se posteriormente a temperatura superficial corrigida através da atribuição da emissividade de cada zona em função do material existente na envolvente.

As ferramentas e procedimentos desenvolvidos foram testados e validados em alguns edifícios do campus da Universidade de Aveiro.

4.2.Principais Componentes

No âmbito deste trabalho foram então desenvolvidas três aplicações em *Matlab®*. Duas aplicações são destinadas à abordagem da imagem digital, onde é efectuado o tratamento e a análise da imagem térmica. A última é referente à abordagem à matriz das temperaturas onde é efectuada uma análise intensiva às temperaturas da envolvente de edifícios obtidas a partir da termografia por infravermelhos, de forma a encontrar e delimitar zonas com possíveis anomalias, ou seja, identificar variações do coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios.

Tal como foi referido anteriormente, a metodologia desenvolvida neste trabalho passa, numa primeira fase, pela captação e pré-tratamento da imagem térmica através do programa da câmara de infravermelhos, sendo de seguida adoptada uma das abordagens supra citadas para as restantes etapas.

A extracção dos dados gerados pelo programa da câmara deverá ser realizada de acordo com a abordagem escolhida. Assim, caso a opção recaia sobre a abordagem da imagem térmica então, terá de ser exportada a imagem digital a cores correspondente, sendo depois submetida aos módulos desenvolvidos para tratamento, análise e identificação automática de zonas de acordo

com a cor. A abordagem das temperaturas requer, por sua vez, apenas o ficheiro com os dados de temperatura superficial extraídos da imagem térmica, onde a análise e a identificação das zonas são efectuadas através das temperaturas superficiais.

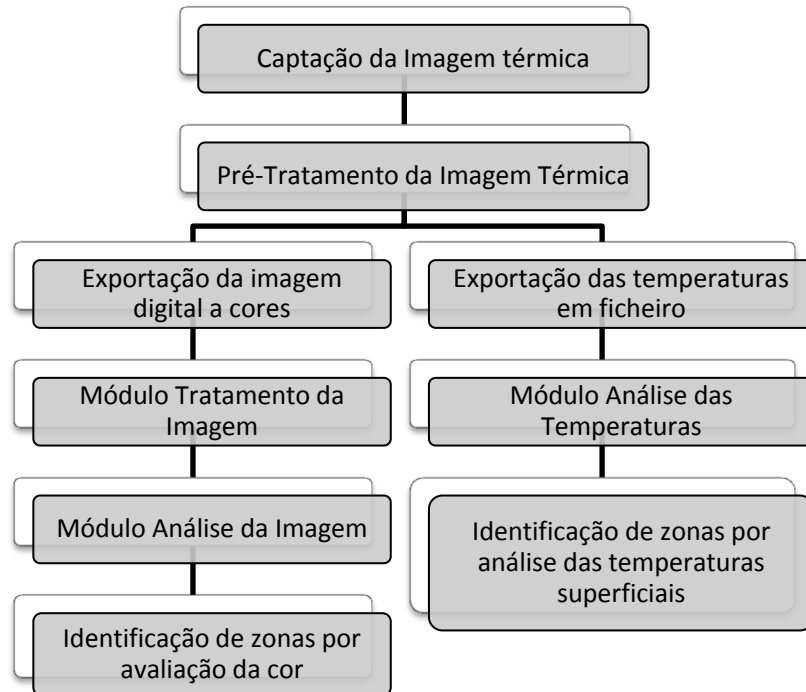


Figura 4.2 – Diagrama da metodologia desenvolvida

Após a identificação das zonas, de modo similar em ambas as abordagens, estas são caracterizadas principalmente em termos de temperaturas (mínima, máxima e média), área, e o respectivo desvio padrão das temperaturas.

4.2.1. Área real do pixel

Para qualquer uma das abordagens desenvolvidas é necessário conhecer a área do pixel, de forma a, posteriormente, poder caracterizar e quantificar as zonas detectadas. Assim, de acordo com Walker [1998], esta pode ser determinada em função do ângulo focal da lente e da distância da lente à superfície em estudo, podendo ser representado em termos de dimensão vertical e horizontal por.

$$FOV_{vert} = 2 \cdot \tan^{-1}(L_{vert}/2d) \quad (4.1)$$

Onde FOV_{vert} é o ângulo focal vertical da lente, d a distância da lente à superfície em metros e L_{vert} a dimensão vertical máxima do campo de captação. Tendo em conta que o ângulo focal da lente do equipamento é um dado fornecido pelo fabricante, então as dimensões reais captadas pela lente podem ser calculadas através de,

$$L_{vert} = 2 \cdot \tan(FOV_{vert}/2) \quad m \quad (4.2)$$

Analogamente,

$$FOV_{hor} = 2 \cdot \tan^{-1}(L_{hor}/2d) \quad (4.3)$$

$$L_{hor} = 2 \cdot \tan(FOV_{hor}/2) \quad m \quad (4.4)$$

Das expressões (4.2) e (4.4) podemos então calcular a área real captada em cada pixel,

$$area_{pixel} = \frac{L_{vert} \times L_{hor}}{Total \text{ Pixeis}} \quad m^2 \quad (4.5)$$

As expressões anteriores apenas podem ser aplicadas quando é garantida a perpendicularidade entre o eixo horizontal da lente e a superfície em estudo [Walker, 1998], logo a sua aplicação está limitada a paredes verticais.

4.2.2. Influência da definição incorrecta da emissividade

O erro mais significativo nas medições termográficas surge da imprecisão da definição do valor de emissividade das superfícies analisadas durante a realização da medição [Minkina *et al.*, 2010]. A sobrestimação do valor de emissividade produz um erro menor na medição da temperatura do que a subestimação deste [Minkina *et al.*, 2009], desta forma, perante a incerteza do valor a escolher, recomenda-se a escolha de um valor entre 0.9 e 1.

Por este motivo, foi desenvolvido o método de correcção da temperatura com base na alteração do valor da emissividade através da aplicação da equação (2.3) à zona da superfície em estudo, dado por:

$$q = \varepsilon_i \cdot A \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad W \quad (4.6)$$

Considerando que $\frac{q}{A \cdot \sigma}$ é constante, temos

$$\varepsilon_i \cdot T_s^4 = \varepsilon_c \cdot T_c^4 \quad (4.7)$$

Assim, a temperatura corrigida T_c é definida por,

$$T_c = T_s \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c}} \quad ^\circ C \quad (4.8)$$

Onde ε_i é a emissividade inicialmente introduzida na aplicação, e que corresponde ao valor definido no equipamento no momento da captação da imagem, ε_c a emissividade corrigida introduzida pelo utilizador após a detecção, tendo em conta o material existente na zona avaliada, T_s a temperatura superficial média calculada pela aplicação.

4.3. Módulo de Análise de Imagem

O objectivo do módulo de análise de imagem foi processar uma imagem térmica proveniente de qualquer tipo de equipamento de termografia, com ou sem o ficheiro de temperaturas, analisando-a como uma imagem digital a cores.

Na Figura 4.3, é apresentado o esquema de funcionamento desta aplicação, destacando-se os dois primeiros passos onde é necessária a intervenção do utilizador, sendo os restantes realizados automaticamente.

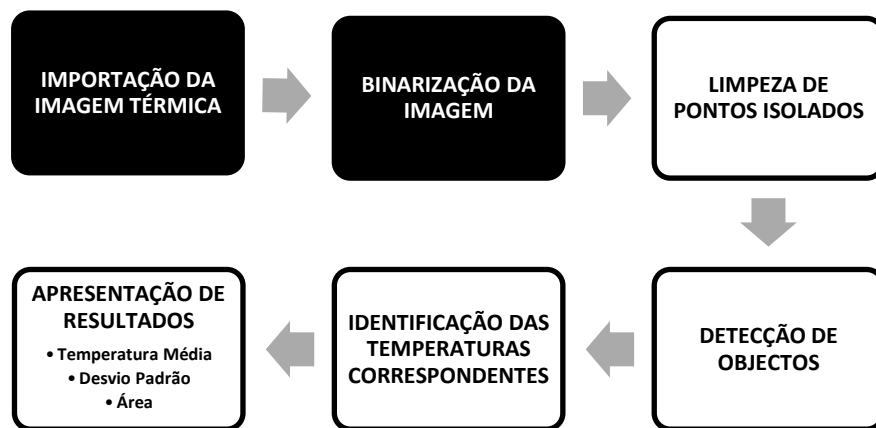


Figura 4.3 - Diagrama do módulo de análise da imagem digital

O formato escolhido inicialmente foi o *JPG* (ou *JPEG* - *Joint Photographic Experts Group*) por se tratar de um formato de imagem largamente difundido no seio da *World Wide Web* no armazenamento e transmissão de imagens.

Posteriormente, verificou-se que este formato não era o mais adequado pois o algoritmo de compactação induzia perdas de informação da imagem, o que originou perda de qualidade gráfica essencial para o processo de análise da cor. Deste modo, e de acordo com a documentação técnica existente [Mathworks, 2010], deverá ser utilizado um formato sem perdas como o *TIFF* (*Tagged Image File Format*), o *PNG* (*Portable Network Graphics*), ou o *BMP* (*Windows Bitmap*). O formato que melhor se adaptou ao módulo foi o *BMP* a 24 Bits.

A abordagem deste módulo passa pela detecção e análise automática dos padrões de cores encontrados, apenas com uma intervenção mínima por parte do utilizador mas, devido ao facto de estarmos a lidar com três matrizes, ou seja, uma matriz para cada cor do espaço *RGB* com a dimensão da imagem térmica, aumenta a complexidade da análise a efectuar.

De modo a obter melhores resultados na fase de limitação a duas cores, ou seja, converter de escala de cinzentos para binário, verificou-se a necessidade de afinar o nível de limitação. Por este motivo, foi desenvolvido um módulo para tratamento em *Matlab*[®] que permitisse verificar e identificar qual o filtro ou técnica adequada à imagem térmica analisada. Este módulo requer que o utilizador interaja com o código aberto em ambiente *Matlab*[®], que embora simples, exige conhecimentos de programação.

Para minimizar os pontos isolados e outros problemas resultantes da conversão de cinzento para duas cores, a imagem em escala de cinzento é realçada por diversas técnicas, pelo histograma normalizado da imagem, ou através da saturação dos valores de intensidade mais elevados da imagem, aplicação do filtro de mediana e, finalmente, a aplicação de um filtro de Wiener.

Para obter a melhor binarização da imagem é necessário conhecer qual o nível de limitação adequado, assim a aplicação desenvolvida contempla o método de *Otsu* para identificar o nível de limitação, sugerindo ao utilizador um valor inicial do nível de conversão a ser inserido. Alternativamente, à imagem em escala de cinzentos é aplicada a detecção de arestas pelos métodos de *Sobel*, *Canny*, Laplaciano da Gaussiana.

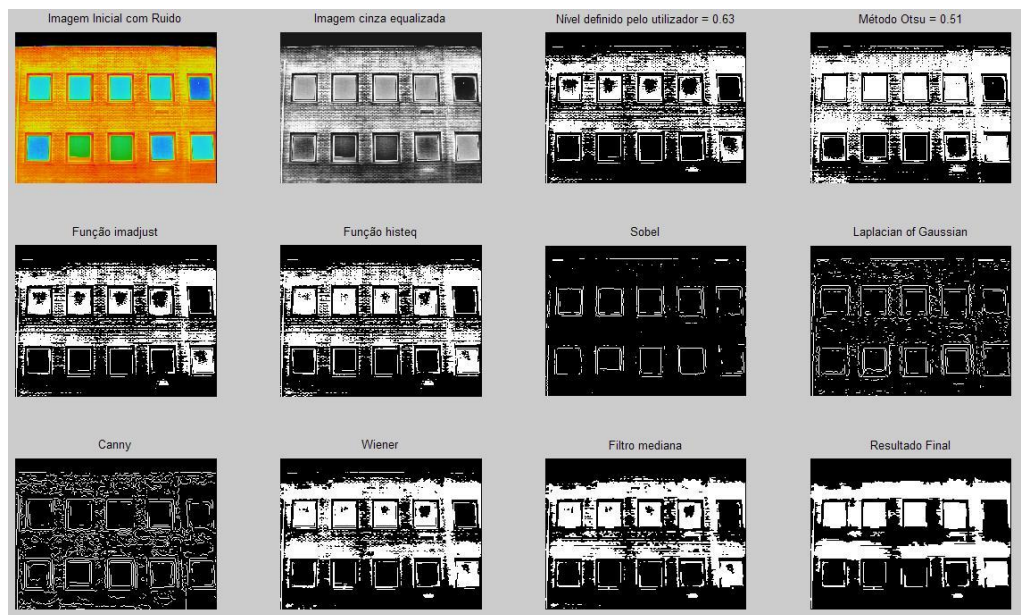


Figura 4.4 – Tratamento da imagem térmica

A técnica ou filtro que conduziu à melhor imagem binária deverá ser registada para depois ser aplicada na fase de análise da imagem, onde são traçadas as fronteiras exteriores das zonas detectadas.

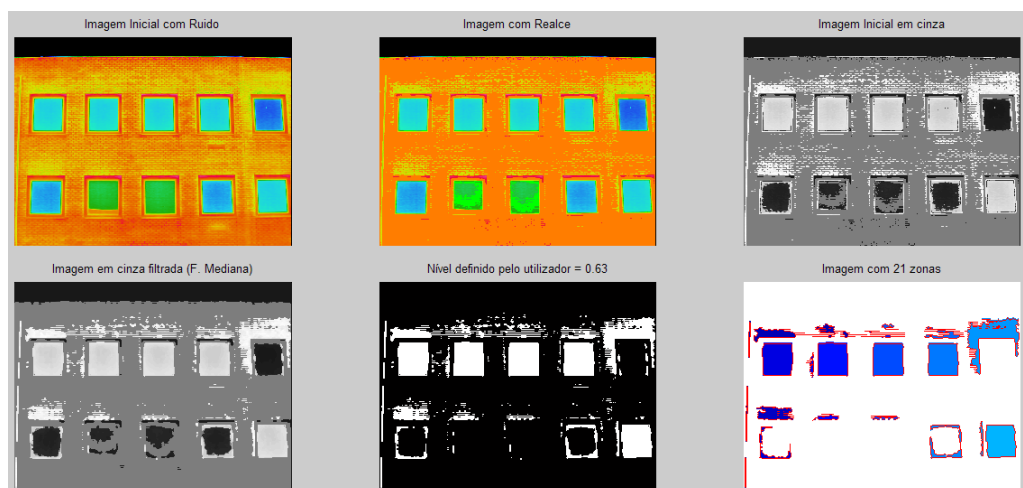
Os resultados obtidos numa primeira fase na escala de cinzentos foram satisfatórios, mas condicionados pela necessidade de converter a imagem a cores para a escala de cinzentos. Por essa razão, foi adicionada uma operação na aplicação de análise para dividir a imagem a cores em regiões, realçando a cor pura e reduzindo desta forma o número de cores da imagem. Para esta análise propôs-se os seguintes intervalos de cores:

Quadro 4.1 – Intervalos propostos para definição de regiões de cores

Região	Cor Pura (R,G,B)	Intervalos propostos		
Vermelha	(255,0,0)	R>200	G<30	B<30
Verde	(0,255,0)	R<50	G>180	B<50
Azul	(0,0,255)	R<30	G<30	B>128
Branco	(255,255,255)	R>200	G>200	B>200
Preto	(0,0,0)	R<50	G<50	B<50
Laranja	(255,125,0)	R>225	85<G<150	B<30
Amarelo	(255,255,0)	R>230	G>230	B<20

A diminuição do número de cores permite uma afinação das cores na imagem térmica e consequentemente, um melhor realce das zonas a estudar na escala de cinzentos.

O módulo de análise, com base no nível de conversão e na técnica determinada anteriormente no tratamento, quando inserida pelo utilizador no código *Matlab®*, efectua a binarização da imagem em escala cinza resultante do processo de realce. A identificação das zonas é feita automaticamente através da segmentação da imagem binária.

**Figura 4.5** – Análise da imagem térmica

Imediatamente a seguir, é solicitada a importação do ficheiro das temperaturas correspondente, onde sem a intervenção do utilizador, são detectadas as temperaturas correspondentes a cada zona e é efectuado o cálculo das temperaturas médias, respectivo desvio padrão e a área correspondente, determinada de acordo com a equação (4.5). Os resultados são apresentados da seguinte forma:

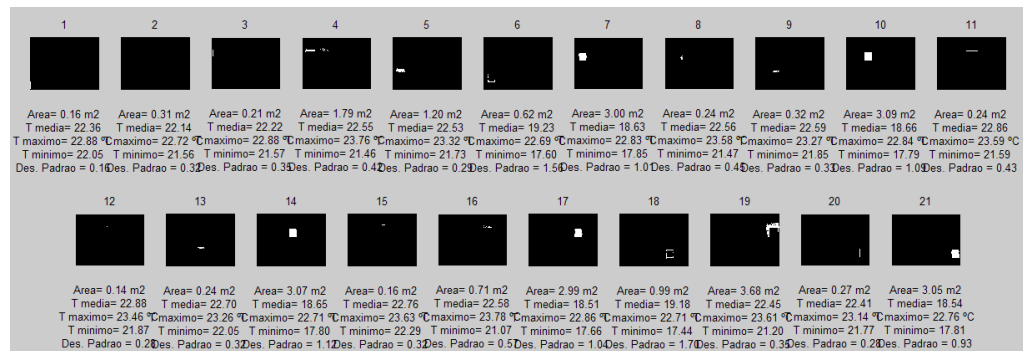


Figura 4.6 – Caracterização das zonas encontradas

Os resultados são depois guardados numa folha de cálculo *Excel*®, e é gerada uma imagem com a localização das zonas.

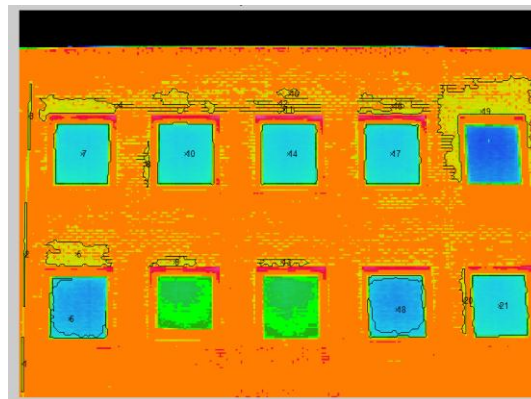


Figura 4.7 – Identificação das zonas na imagem térmica

Como a análise e a identificação das zonas é efectuada de forma automática, reconhece-se a limitação da aplicação pois, por vezes, exclui zonas que são facilmente identificadas visualmente pelo utilizador. Daqui surge a necessidade de uma interacção entre a aplicação e o utilizador até ser alcançado um resultado representativo da realidade verificada.

4.3.1. Construção da matriz das temperaturas com base na imagem digital

Tendo em conta que os resultados obtidos neste módulo dependem do ficheiro de temperatura, foi tentada uma nova abordagem com objectivo de aumentar o campo de actuação do módulo à análise de imagens térmicas sem a existência da matriz das temperaturas correspondentes, e onde seria necessário conhecer a temperatura máxima e mínima registada na imagem.

Huang *et al.* [2010] apresentam no seu trabalho uma expressão para, através da temperatura máxima, mínima e local, T_{max} , T_{min} , T respectivamente, proceder à conversão para o nível de intensidade em cinza e construir a imagem térmica a partir da matriz das temperaturas,

$$DN = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \times 255 \quad (4.9)$$

A equação (4.9) devidamente trabalhada pode, por sua vez, ser utilizada para a partir da imagem, obter a temperatura correspondente ao nível do pixel.

$$T = T_{min} + \frac{DN}{255} (T_{max} - T_{min}) \quad (4.10)$$

Para que o módulo desenvolvido processe as imagens térmicas provenientes de qualquer equipamento, e na ausência da importação do ficheiro de temperatura correspondente, aplicou-se a metodologia proposta por Huang *et al.* [2010] mas para reconverter a imagem a cores no sistema *RGB* em matriz de temperaturas, que de acordo com a equação (3.1) é possível determinar o *DN*, onde *R*, *G*, *B* são as matrizes com a mesma dimensão da imagem:

$$DN = 0.3 R + 0.59 G + 0.11 B \quad (4.11)$$

Propõe-se, desta forma a construção da matriz das temperaturas só com o conhecimento da temperaturas máxima e mínima e da imagem em formato *RGB* correspondente,

$$T = T_{min} + \frac{(0.3R + 0.59G + 0.11B)}{255} (T_{max} - T_{min}) \quad (4.12)$$

Os resultados alcançados foram inconclusivos devido ao problema encontrado em definir e restringir as combinações de cor, para assim, obter as temperaturas correctas. Por este motivo, esta abordagem não foi acrescentada ao módulo de análise pois carece de mais desenvolvimento e a verificação do mesmo no espaço *HSV*.

4.4.Módulo de Tratamento de Temperaturas

O módulo de tratamento de temperaturas surgiu devido à necessidade de analisar, detalhadamente, a informação contida no ficheiro das temperaturas. Ao verificar a possibilidade de construir a imagem térmica unicamente a partir do ficheiro das temperaturas com uma simples operação de conversão de ficheiro para forma matricial, levou a que fosse concebido um módulo totalmente independente do anterior. Portanto, a importação da imagem digital a cores deixou de ser necessária, deixando de lado o tratamento da imagem eliminando o erro associado à conversão para imagem digital.

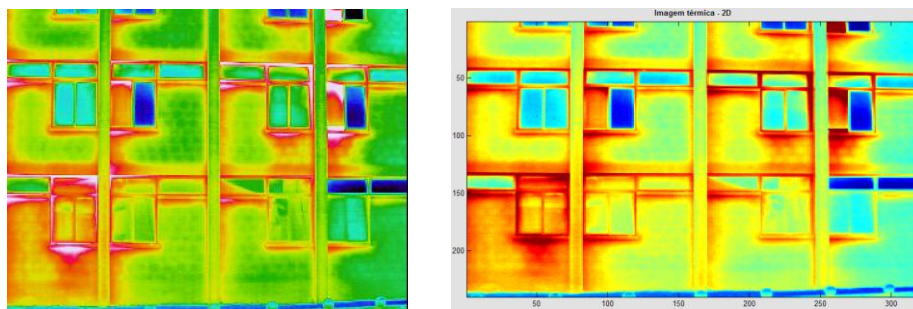


Figura 4.8 – Imagem digital a cores e imagem construída no módulo em *Matlab*®

A aplicação desenvolvida requer uma intervenção reduzida do utilizador, pois a análise passa apenas pelo tratamento de uma matriz com os respectivos valores de temperatura em cada ponto. Desta forma, a complexidade desta aplicação é menor que a anterior permitindo a utilização por parte de utilizadores menos experientes ou familiarizados com a aplicação. Ainda assim, de forma a facilitar a utilização do programa foi desenvolvido um interface gráfico usando a ferramenta GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) do *Matlab*®, eliminando por completo qualquer interacção do utilizador com o código utilizado na programação, ao contrário dos módulos anteriormente descritos. Esta aplicação foi denominada de TIV (Termografia por Infravermelhos), e apresenta o seguinte painel de abertura.

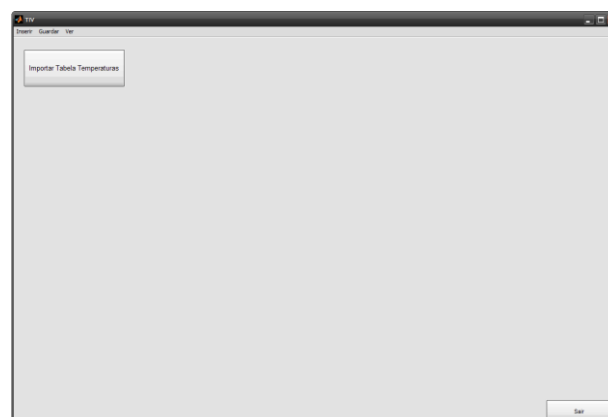


Figura 4.9 – Painel inicial do módulo de temperaturas - TIV

Resumidamente, o módulo procede à análise das temperaturas superficiais da envolvente procurando encontrar e delimitar as diversas zonas de interesse e respectivas propriedades (área, temperatura superficial média e emissividade). Posteriormente, é obtida a temperatura superficial corrigida através da atribuição da emissividade de cada zona, em função do material existente nessa zona da envolvente, identificando assim possíveis variações do coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios.

Na Figura 4.10, é apresentado o princípio de funcionamento desta aplicação, destacando-se dois passos onde é necessária a intervenção do utilizador, a importação do ficheiro das temperaturas e a manipulação gráfica da imagem equivalente, sendo os restantes realizados automaticamente.

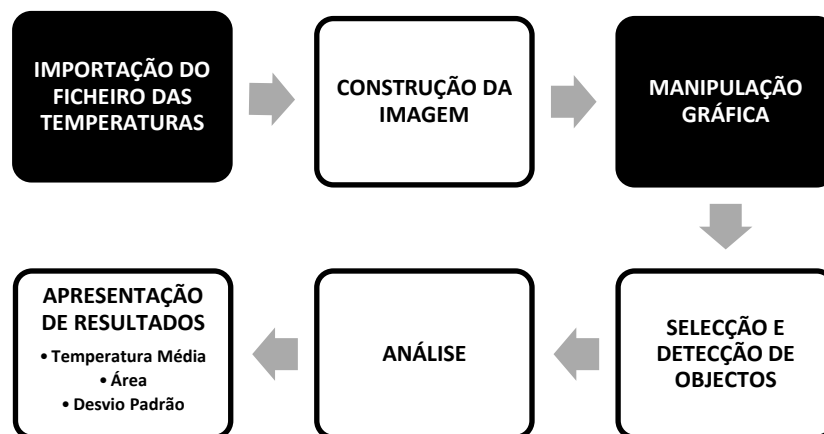


Figura 4.10 - Diagrama do módulo de tratamento de temperaturas

Ao iniciar a importação do ficheiro das temperaturas para a aplicação, o utilizador terá de disponibilizar, em formato *Excel*®, o ficheiro exportado através do software da câmara que aqui será convertido automaticamente sob forma matricial. Será sobre a matriz das temperaturas resultante que serão realizadas todas as operações de análise desta aplicação.

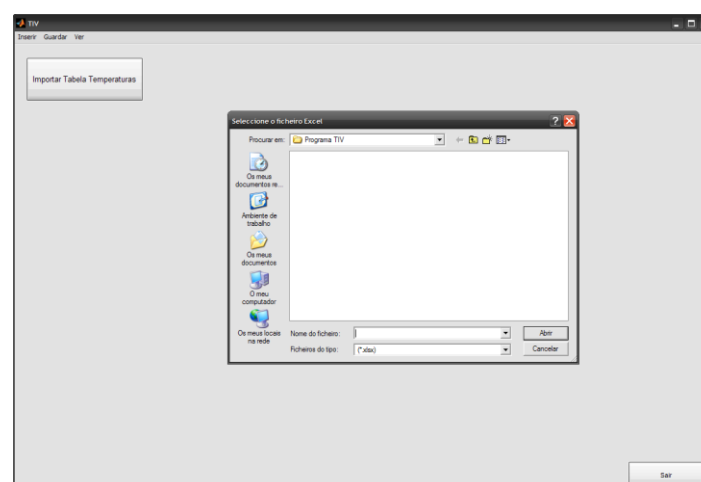


Figura 4.11 – Importação do ficheiro de temperaturas para o TIV

A imagem térmica é construída sob a forma de gráfico a duas dimensões com base nos valores de temperatura em cada ponto da matriz. Aqui, a representação gráfica escolhida utiliza a escala *jet*, i.e., atribui a cor azul ao valor mínimo (temperatura mais baixa) e o vermelho ao valor máximo.

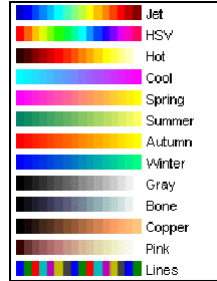


Figura 4.12 – Mapas de cor disponíveis em imagens digitais [Mathworks, 2010]

A representação da imagem construída pode ser feita numa imagem térmica a duas dimensões (2D), contorno isotérmicas ou a três dimensões (3D). A representação 3D só agora começa a ser integrada nos softwares comerciais, tais como os abordados no ponto 3.1.3, e vem contribuir para a interpretação dos resultados obtidos, pois aproximam-se da perspectiva observada pelo olho humano.

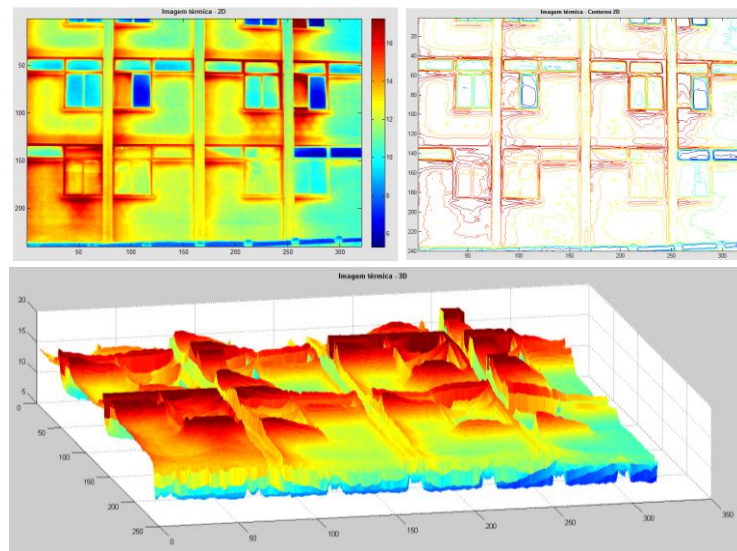


Figura 4.13 – Imagem 2D, Contorno Isotérmicas e 3D construída na aplicação TIV

Após a construção da imagem, é verificado na matriz a existência de temperaturas negativas que normalmente estão associadas a zonas captadas que representam o céu que por norma distorcem a atribuição da gradação da cor, prejudicando a representação da imagem. Assim, caso sejam detectadas temperaturas inferiores a zero, é apresentada uma mensagem questionando o utilizador se pretende corrigir estes valores. Como exemplo, é apresentado um caso com uma imagem térmica contendo valores de temperatura negativos:

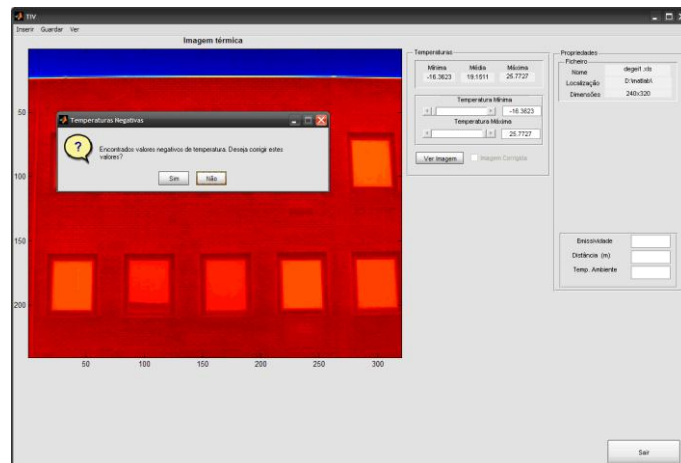


Figura 4.14 – Mensagem de detecção de temperaturas negativas

Em caso afirmativo, as temperaturas negativas são substituídas pelo valor zero, que de acordo com as simulações efectuadas é o valor mínimo para não descaracterizar a imagem térmica. Na figura seguinte são comparadas as duas possibilidades, a primeira sem correcção ou seja mantém os valores negativos referentes ao céu que foi captado na imagem, e a segunda com os valores corrigidos, onde nota se uma melhoria nas diferenças de temperatura.

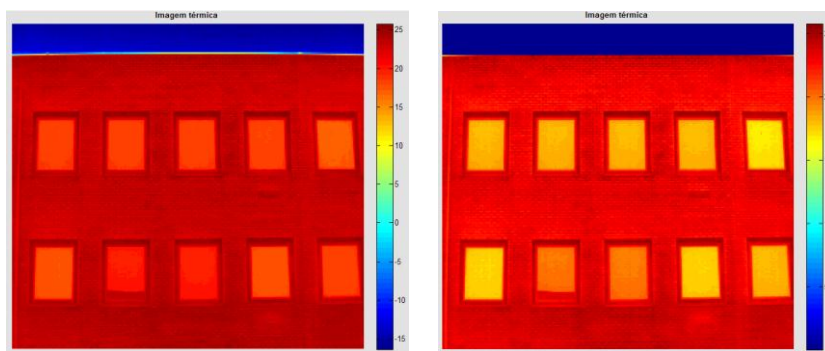


Figura 4.15 – Representação com temperaturas negativas sem correcção e com correcção

Na fase seguinte, é solicitado ao utilizador a introdução de três parâmetros registados durante a captação da imagem térmica, a emissividade, a temperatura ambiente e a distância da lente à superfície. De seguida, é apresentada a sequência dos painéis para a introdução dos dados.

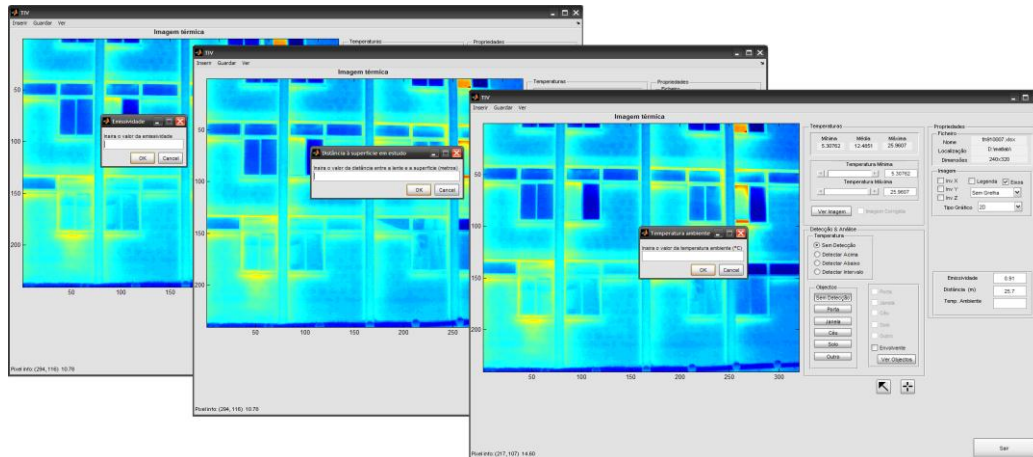


Figura 4.16 – Introdução da emissividade, distância e temperatura ambiente no TIV

Seguidamente é carregado o Painel Propriedades (Figura 4.17) onde são caracterizadas diversas propriedades;

- Propriedades do ficheiro importado (nome, endereço e dimensão da matriz);
- Propriedades da imagem, onde é realizada a manipulação gráfica da imagem, permitindo de uma forma simples manusear os dados contemplados na matriz com o objectivo de tornar a interpretação mais clara, recorrendo à ajuda das ferramentas de manipulação de várias propriedades da imagem para melhor visualização (legenda, grelha, eixos, tipo de gráfico 2D/3D/Isotérmica);
- Propriedades do equipamento, onde constam os dados referentes à câmara de infravermelhos (FOV - vertical e horizontal, cujo valor seleccionado por defeito é referente à câmara *NEC/AVIO®-TH9100MLN*), e o valor da área mínima detectável (área do pixel) calculada através da equação (4.5);
- Valores dos dados introduzidos pelo utilizador referentes à captação da imagem (emissividade, distância da lente à superfície em estudo e temperatura ambiente no local).

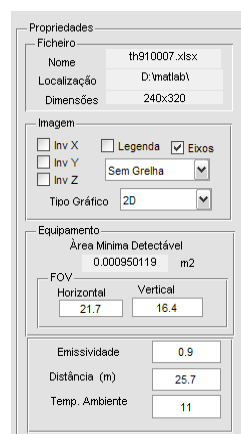


Figura 4.17 – Painel propriedades

No painel seguinte (Figura 4.18) estão representadas as temperaturas globais encontradas na matriz (mínima, média e máxima), podendo o utilizador proceder à alteração dos valores de temperatura mínimos e máximos apresentados alterando assim a escala de temperaturas na imagem através da saturação dos valores, i.e., todos os valores detectados fora do intervalo escolhido assumem os limites do intervalo.



Figura 4.18 – Painel temperaturas

Na fase seguinte, é efectuada a detecção de objectos contidos na imagem que o utilizador considere supérfluos, ou prejudiciais, à análise da envolvente. O painel Detecção & Análise, está dividido de acordo com duas abordagens distintas, a primeira pela temperatura, onde a detecção é realizada através da manipulação de intervalos de temperatura como se pode ver na figura seguinte:

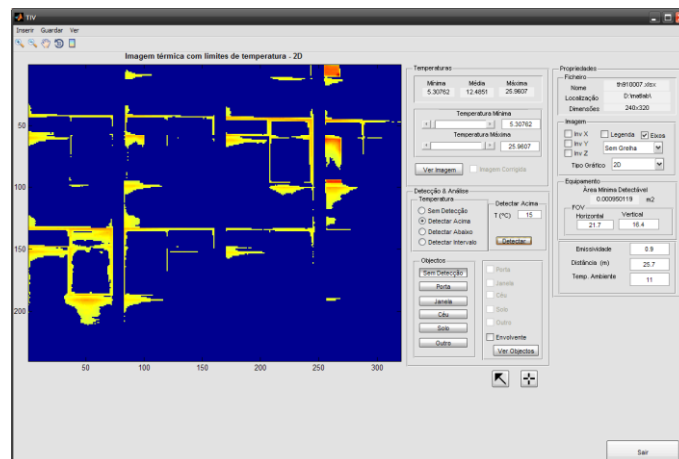


Figura 4.19 – Detecção por manipulação dos intervalos de temperatura

A segunda abordagem, foram catalogados uma série de objectos tipicamente encontrados numa imagem térmica de uma fachada de um edifício, sendo eles, porta, janela, céu e solo, e a respectiva remoção passa pela aplicação das ferramentas de desenho para selecção de áreas.

O principal motivo em desenvolver uma ferramenta de selecção de áreas foi para eliminar certos efeitos criados por objectos, como por exemplo, o vidro das janelas no comprimento de onda da câmara aplicada a edifícios são opacos e altamente reflectivos, o que vem perturbar a radiação captada adulterando a imagem térmica, ou seja, a principal razão em remover as janelas da análise são os vidros se que comportam como espelhos, reflectindo a radiação da vizinhança.

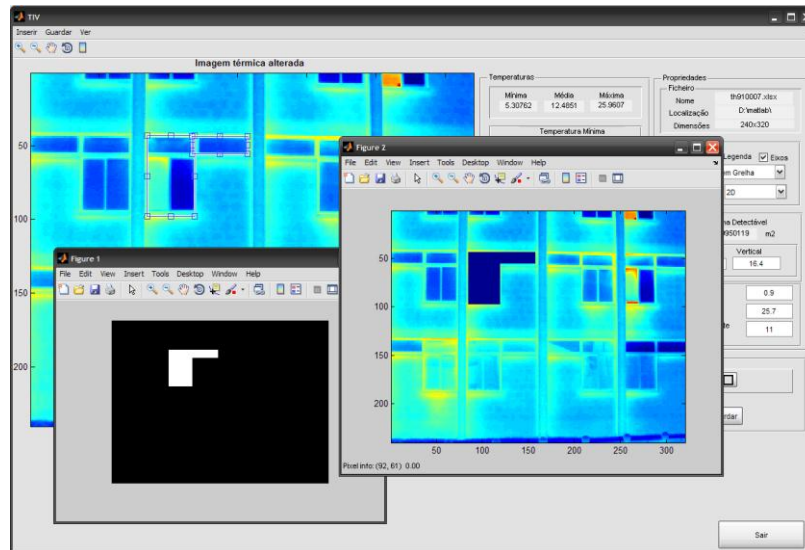


Figura 4.20 – Detecção de objectos por selecção de área

Por fim, as diversas zonas seleccionadas podem ser visualizadas de acordo com a combinação de escolhas do utilizador. Na Figura 4.21 é apresentado um outro exemplo onde foram removidos dois objectos distintos, céu e janela.

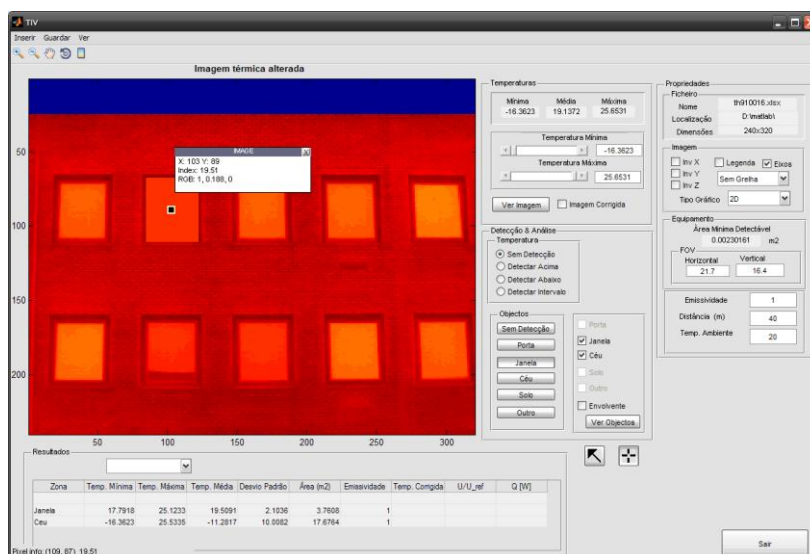


Figura 4.21 – Objectos removidos da envolvente

No que concerne à análise da envolvente, são calculadas várias zonas de temperatura em função de um número de intervalos determinado pelo utilizador, ou seja, número de divisões entre a temperatura mínima e a máxima da matriz.

Número Intervalos

Calcular

Figura 4.22 – Painel número de intervalos

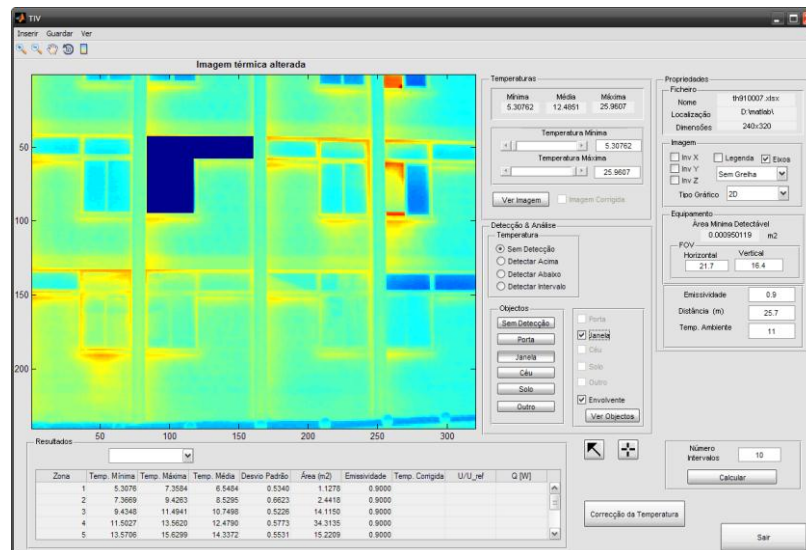


Figura 4.23 – Análise da envolvente

Posteriormente, é efectuado o cálculo dos parâmetros para cada zona, nomeadamente, temperatura (mínima, média e máxima), desvio padrão e área. A área é determinada de acordo com a equação (4.5) e multiplicada pelo número de pontos da respectiva zona.

Tendo em conta o erro associado à selecção da emissividade no momento da captação da imagem, o utilizador pode editar o campo emissividade na tabela dos resultados, introduzindo o valor da emissividade corrigida em função da zona detectada, onde será calculada a temperatura corrigida através da equação (4.8).

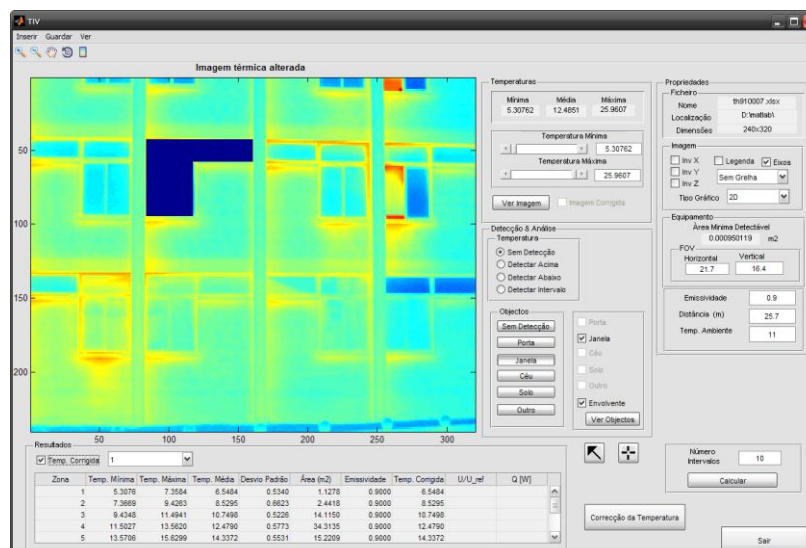


Figura 4.24 – Correcção da temperatura pela emissividade

Quando uma superfície de baixa emissividade é medida, a correcção da emissividade não é suficiente para evitar erros nos valores de temperatura superficial medidos.

4.4.1. Estimativa do fluxo de calor

Um método para estimar o fluxo de calor envolvido em cada zona também é apresentado, mas apenas deve ser considerado como um valor indicativo pois é limitado à incerteza dos valores concretos das variáveis conhecidas. Assim, podemos caracterizar o fluxo de calor na superfície como resultante da convecção e radiação do seguinte modo

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) + \sigma \cdot \alpha \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad W.m^{-2} \quad (4.13)$$

Desenvolvendo a equação anterior resulta,

$$q'' = [h + \sigma \cdot \alpha \cdot (T_s + T_\infty) \cdot (T_s^2 + T_\infty^2)] \cdot (T_s - T_\infty) \quad W.m^{-2} \quad (4.14)$$

Onde h assume o valor de $25 W.m^{-2}$ de acordo com o RCCTE [2006], para o exterior de paredes verticais ($R_{se} = 0.04$). Os valores típicos de h apresentados na literatura estão compreendidos no intervalo de 14 e $30 W.m^{-2}$. Reformulando a equação (4.14), resulta

$$q'' = h_{corr} \cdot (T_s - T_\infty) \quad W.m^{-2} \quad (4.15)$$

onde h_{corr} representa a combinação dos efeitos da radiação e convecção no fluxo de calor da superfície.

A aplicação das equações (4.14) e (4.15) está condicionada por diversos parâmetros, tais como, o erro associado à medição termográfica da temperatura superficial T_s , a utilização do valor da temperatura do ar em vez da temperatura da vizinhança T_∞ e a absorvidade α da superfície, sendo um parâmetro alvo de estudos futuros.

Assim, o cálculo da estimativa do calor envolvido em cada zona também é apresentado, mas apenas deve ser considerado como um valor indicativo pois é limitado à incerteza dos valores das variáveis conhecidas. Este valor é determinado pela conjugação da equação (4.14) com a área da respectiva zona.

$$Q = q'' \cdot A \quad W.m^{-2} \quad (4.16)$$

O conhecimento do valor de Q para cada zona permite, por sua vez, diferenciar as zonas onde o valor de U é realmente de ter em consideração, das situações onde o U seja elevado mas corresponde a uma área diminuta irrelevante da envolvente analisada.

4.4.2. Cálculo da relação entre valores de U

Tal como já foi referido anteriormente, o coeficiente de transmissão térmica U é um parâmetro importante na Certificação Energética de Edifícios, por essa razão foi desenvolvida uma abordagem cujo resultado é meramente indicativo da relação entre os vários valores de U detectados numa fachada tendo por base as diferenças de temperaturas superficiais encontradas.

O fluxo de calor que atravessa a superfície é definido através da equação (4.15), e que pode ser relacionado em função de duas zonas distintas da mesma superfície, q_1'' e q_2'' , da seguinte forma

$$\frac{q_1''}{q_2''} = \frac{h_{corr,1} \cdot (T_1 - T_\infty)}{h_{corr,2} \cdot (T_2 - T_\infty)} \quad (4.17)$$

Obtemos assim, a relação do fluxo de calor entre duas zonas com base nas temperaturas superficiais T_1 e T_2 , da temperatura do ar ambiente T_∞ , e dos respectivos coeficientes de transferência de calor. Por outro lado, o fluxo de calor também está relacionado com diferencial térmico e a resistência térmica global, sendo dado por

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{T_\infty - T_{int}}{R_t} \quad W.m^{-2} \quad (4.18)$$

Estabelecendo a relação entre duas zonas na mesma superfície com a conjugação das equações (2.16) e (4.18), então temos

$$\frac{q_1''}{q_2''} = \frac{\frac{T_\infty - T_{int}}{R_{t1}}}{\frac{T_\infty - T_{int}}{R_{t2}}} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{U_1}{U_2} \quad (4.19)$$

Aplicando a equação (4.19) a uma zona de estudo i e a uma zona de referência, podemos escrever

$$\frac{U_i}{U_{ref}} = \frac{q_i''}{q_{ref}''} \quad (4.20)$$

que conjugada com a equação (4.7) resulta na relação de qualquer zona i da superfície com a zona de referência

$$U_i = \frac{h_{corr,i} \cdot (T_i - T_\infty)}{h_{corr,ref} \cdot (T_{ref} - T_\infty)} \times U_{ref} \quad W.m^{-2}.K^{-1} \quad (4.21)$$

Futuramente, esta metodologia conjugada com a aplicação de um método não invasivo de determinação do U , como por exemplo com um fluxímetro na zona escolhida como referência, pode resultar na caracterização térmica de toda fachada do edifício.

Outro método alternativo passa por cobrir ou substituir uma janela ou outro elemento da envolvente por um painel de material cujo valor de U e da emissividade seja conhecido (e.g., placa de EPS revestida por tinta preta). Desta forma, podemos referenciar toda a envolvente relativamente à zona do painel.

A relação entre os vários valores de U detectados na fachada tendo por base as diferenças de temperaturas superficiais encontradas é calculada de acordo com a equação (4.21) e com base nos valores de temperatura corrigida obtidos pela equação (4.8).

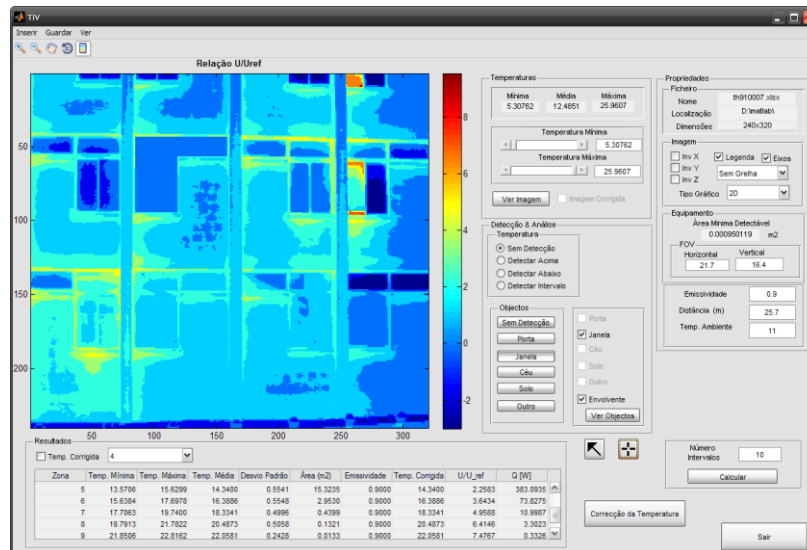


Figura 4.25 – Relação entre o U_i e U_{ref}

Devido ao facto de no método apresentado ser utilizada a temperatura do ar em vez de temperatura da vizinhança, se não for realizada uma correcção de temperaturas adequada, poderá ocorrer detecção de temperaturas superficiais captadas inferiores à temperatura ambiente, o que resultaria em valores negativos (e pouco realistas) para U . Assim, de modo a minimizar a influência decorrente desta diferença de temperatura negativa (entre temperatura superficial de referencia e temperatura ambiente), o módulo apresentado rejeita as zonas em que seja identificado um valor para U inferior a zero, e atribui-lhes o valor zero, o que significa que não é possível estabelecer qualquer relação com a zona em questão. Assim, para a uma determinação mais precisa da relação entre os valores de U encontrados, é sugerida a remoção prévia destas zonas para o cálculo supra citado com as ferramentas desenvolvidas para o efeito.

Futuramente, de modo a minimizar o erro acima descrito, a correcção da temperatura superficial apresentada no ponto 4.2.2 deverá ser efectuada com base no método do espelho difuso para determinação do valor da temperatura da vizinhança apresentado por Datcu *et al.* [2005].

Os resultados provenientes da análise são apresentados conjuntamente em forma tabelar e de imagem. O módulo permite a escolha da zona a visualizar, sendo esta apresentada numa imagem 2D, isotérmica ou 3D na aplicação, ou numa janela independente.

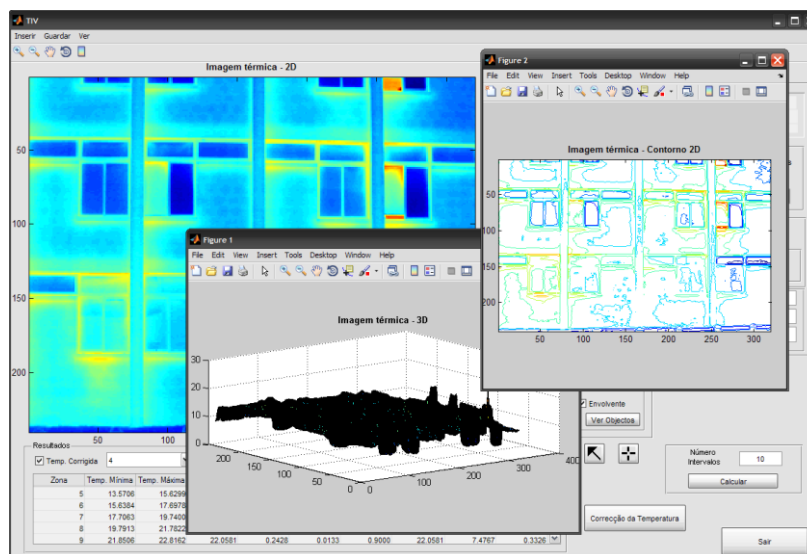


Figura 4.26 – Apresentação dos resultados da análise

Os resultados podem ser depois armazenados numa folha de cálculo *Excel*®, assim como, a imagem gerada com a localização das zonas.

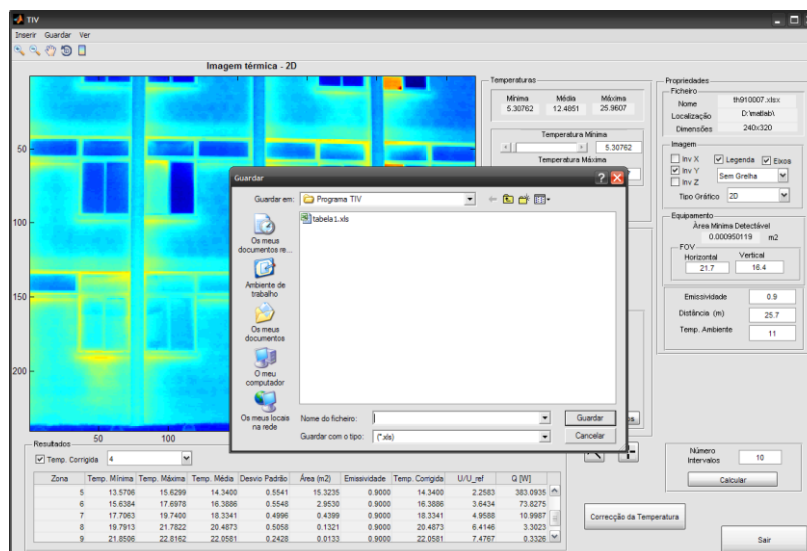


Figura 4.27 – Exportação dos resultados para ficheiro

5. Caso de estudo

O caso de estudo aqui abordado tem a finalidade de demonstrar as potencialidades da metodologia desenvolvida, sendo estudadas duas imagens térmicas recolhidas de dois edifícios distintos no campus da Universidade de Aveiro, nomeadamente o caso 1 - edifício composto maioritariamente por salas de aulas e o caso 2 - residência universitária.

Após a captação da imagem térmica, a visualização e pré-tratamento é efectuado no programa da câmara, *Viewer Program*® e *Report Generator*® [Nec San-Ei, 2005a, 2005b], resultando daqui a exportação da imagem digital (RGB) e do ficheiro (Excel®).

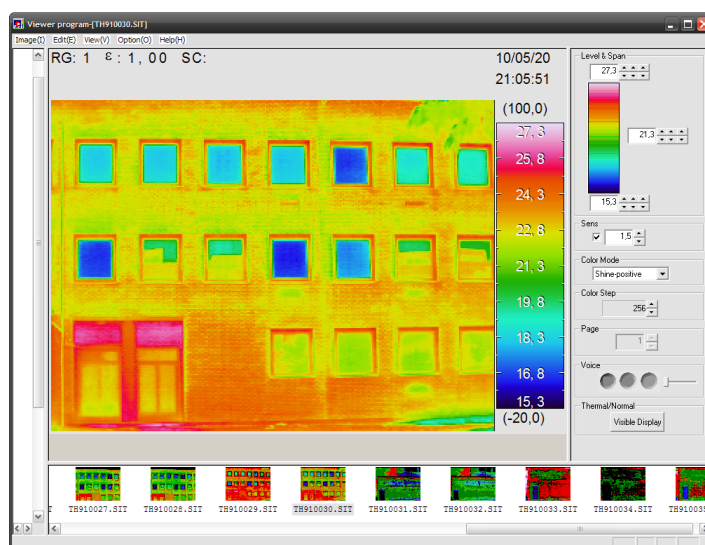


Figura 5.1 – Imagem térmica no programa de visualização da câmara NEC/AVIO®

O presente caso de estudo divide-se em duas partes de acordo com as abordagens seleccionadas. A primeira parte do estudo diz respeito à abordagem à imagem digital, sendo apresentada a respectiva aplicação do módulo de tratamento de imagem. Na segunda parte é apresentada a abordagem à matriz das temperaturas através da aplicação *TIV*.

5.1. Parte 1 – Abordagem imagem digital

De seguida apresentam-se as imagens digitais no formato *RGB* resultantes da exportação que posteriormente foram submetidas ao módulo de tratamento de imagem.

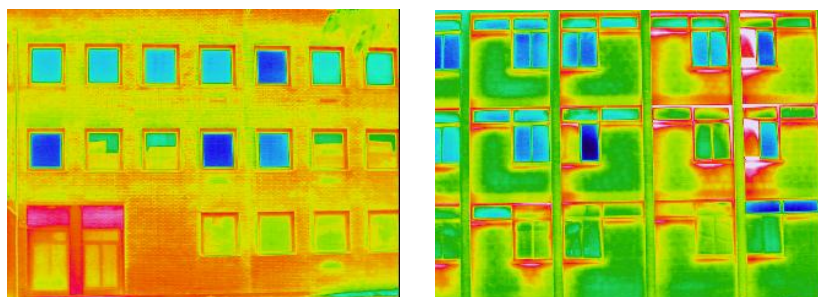


Figura 5.2 – Imagens térmicas em formato *RGB* (caso 1 e 2)

5.1.1. Caso 1

O módulo de tratamento é um processo iterativo, onde o utilizador necessita de introduzir o valor de conversão do nível de cinzento até obter a melhor binarização da imagem.

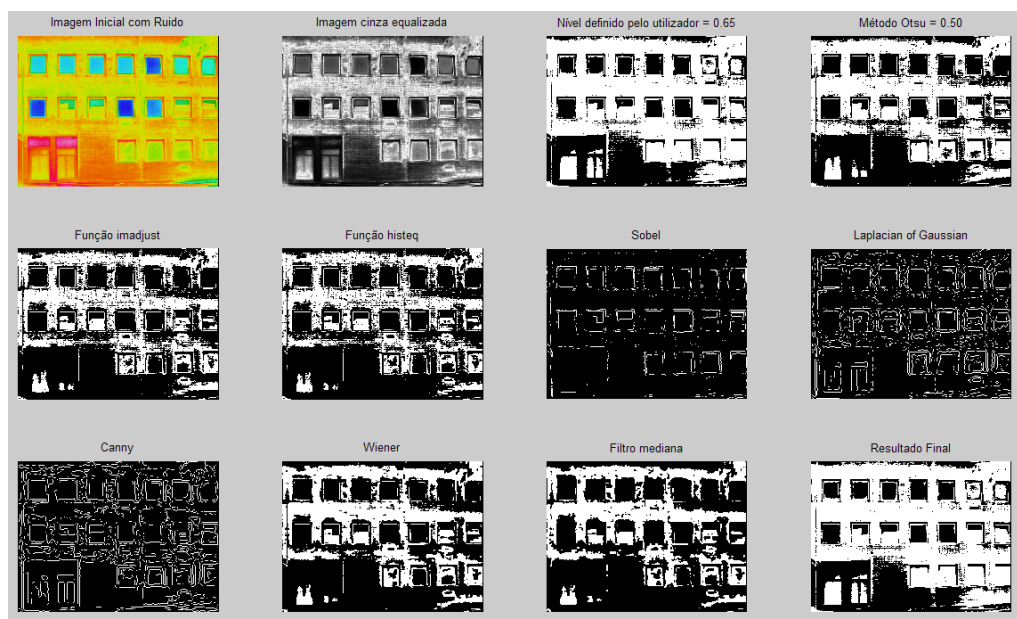


Figura 5.3 – Tratamento da imagem térmica (caso 1)

O resultado deste pré-processamento foi uma binarização com um nível de conversão de cinza de 0.65 e uma operação morfológica para remoção de pontos isolados.

Depois do pré-tratamento efectuado onde, por sua vez, foram detectados os parâmetros que melhor garantem a binarização da imagem a analisar, passou-se à análise no módulo de tratamento de imagem.

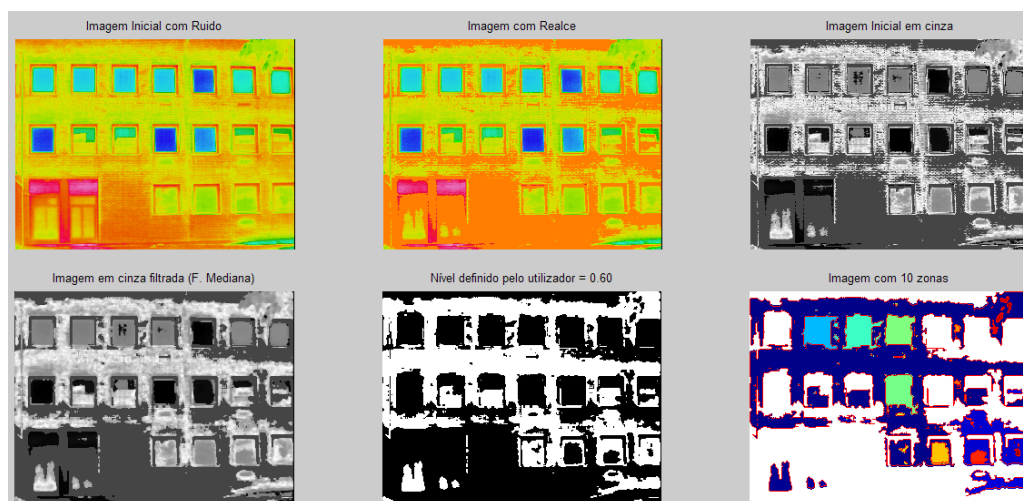


Figura 5.4 – Análise da imagem térmica (caso 1)

Como se pode verificar na Figura 5.4, o realce da cor na imagem vem ajudar a destacar as diferenças registadas entre zonas, e com um ajuste no nível de conversão de cinzento foram identificadas 10 zonas distintas.

Ao executar o módulo é pedida a importação do ficheiro das temperaturas correspondente, que por sua vez, são detectadas de forma automática as temperaturas correspondentes a cada zona cujos resultados são apresentados da seguinte forma:

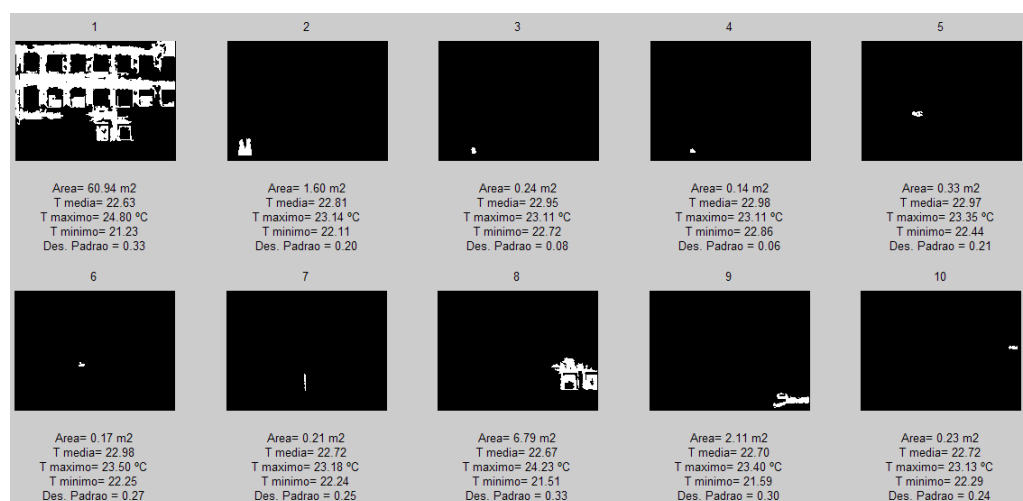


Figura 5.5 – Caracterização das zonas encontradas (caso 1)

São depois apresentadas as zonas encontradas na imagem térmica com a definição das fronteiras e do respectivo centro.

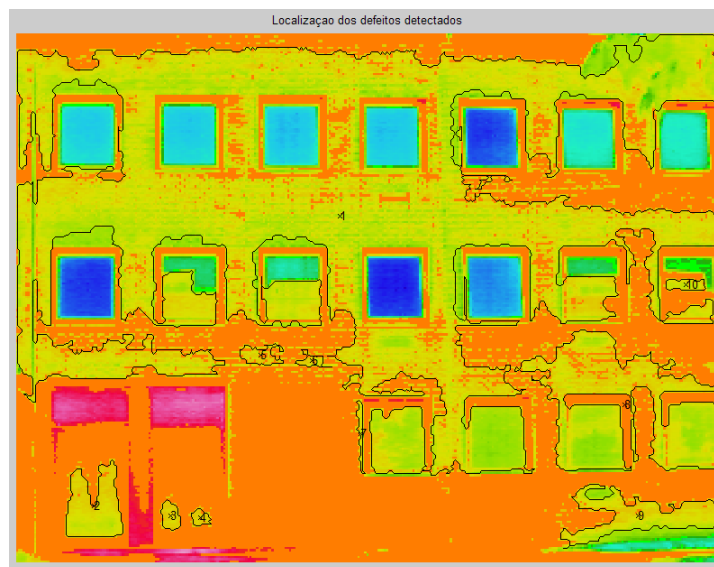


Figura 5.6 – Identificação das zonas na imagem térmica (caso 1)

Finalmente, é criado um ficheiro em *Excel*® com os resultados tal como se pode ver no quadro seguinte.

Quadro 5.1 – Resultados da análise da imagem (caso 1)

Zona	Área (m ²)	Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
1	60.94	22.63	0.33
2	1.60	22.81	0.20
3	0.24	22.95	0.08
4	0.14	22.98	0.06
5	0.33	22.97	0.21
6	0.17	22.98	0.27
7	0.21	22.72	0.25
8	6.79	22.67	0.33
9	2.11	22.70	0.30
10	0.23	22.72	0.24

5.1.2. Caso 2

No que diz respeito à imagem térmica para o caso 2, o procedimento efectuado foi idêntico ao anterior. Assim, foi efectuado um pré-processamento para verificar os parâmetros de binarização apresentados na Figura 5.7.

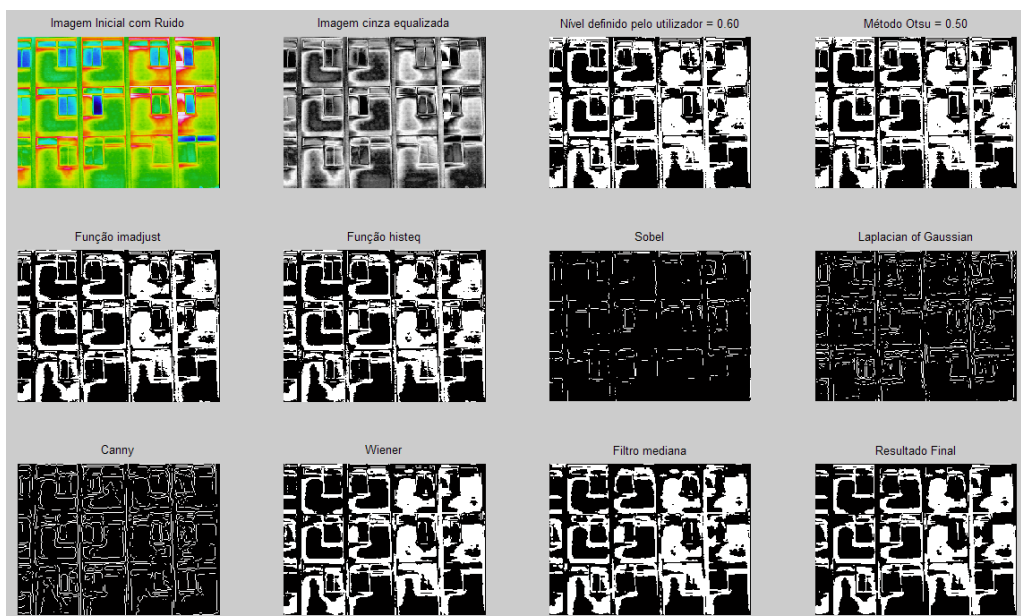


Figura 5.7 – Pré-processamento da imagem térmica (caso 2)

A solução proposta neste pré-processamento é o filtro de *Wiener* com um nível de conversão de cinza de 0.60. De seguida, é apresentado o processamento efectuado no módulo de análise da imagem.

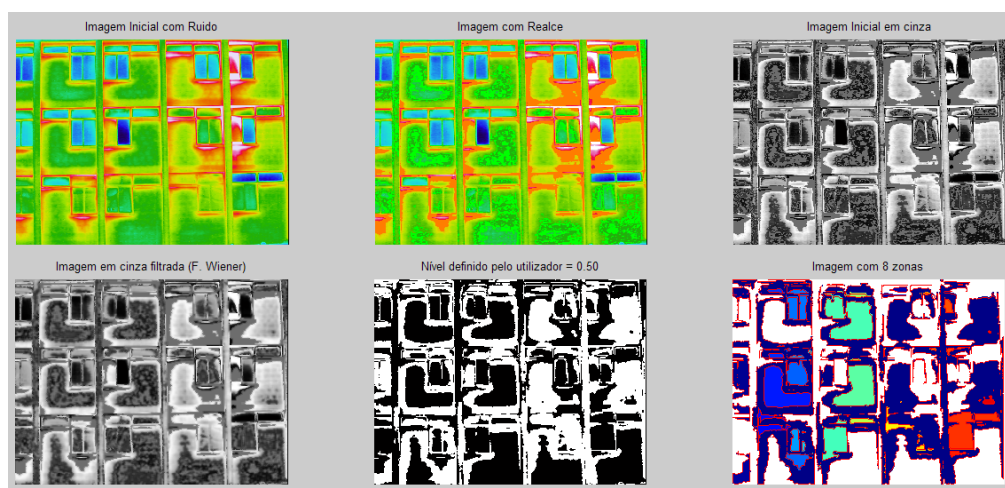


Figura 5.8 – Análise da imagem térmica (caso 2)

Verifica-se na Figura 5.8, a influência do realce da cor na imagem, o qual além de destacar as diferenças registadas entre zonas, modifica também o resultado da binarização e dá origem à identificação de 8 zonas distintas.

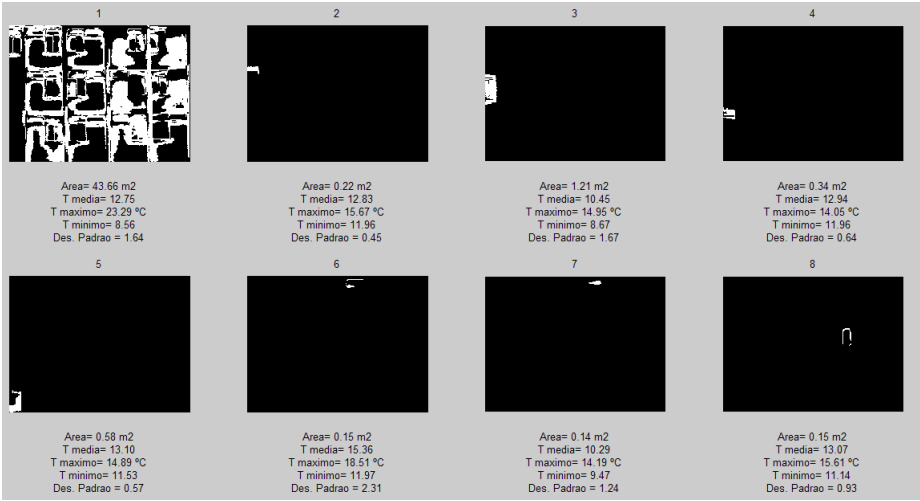


Figura 5.9 – Caracterização das zonas encontradas (caso 2)

São depois apresentadas as zonas encontradas na imagem térmica com a definição das fronteiras e do respectivo centro.

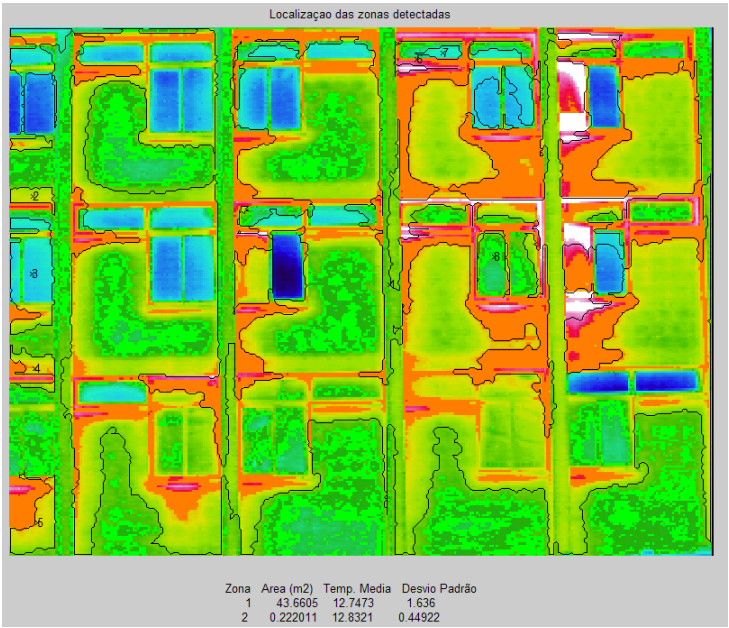


Figura 5.10 – Identificação das zonas na imagem térmica (caso 2)

Finalmente, é criado um ficheiro em *Excel*® com os resultados tal como se pode ver no quadro seguinte.

Quadro 5.2 – Resultados da análise da imagem (caso 2)

Zona	Área (m²)	Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
1	43.66	12.75	1.64
2	0.22	12.83	0.45
3	1.21	10.45	1.67
4	0.34	12.94	0.64
5	0.58	13.10	0.57
6	0.15	15.36	2.31
7	0.14	10.29	1.24
8	0.15	13.07	0.93

5.2. Parte 2 – Abordagem matriz temperaturas

Nesta segunda parte é apresentada a abordagem à matriz das temperaturas através da aplicação TIV.

5.2.1. Caso 1

O ficheiro de temperaturas aqui tratado diz respeito à imagem térmica recolhida pelo exterior de um edifício composto maioritariamente por salas de aulas, localizado no campus da Universidade de Aveiro. Na Figura 5.11 é apresentada a respectiva imagem térmica conjuntamente com a imagem visível do caso aqui analisado.

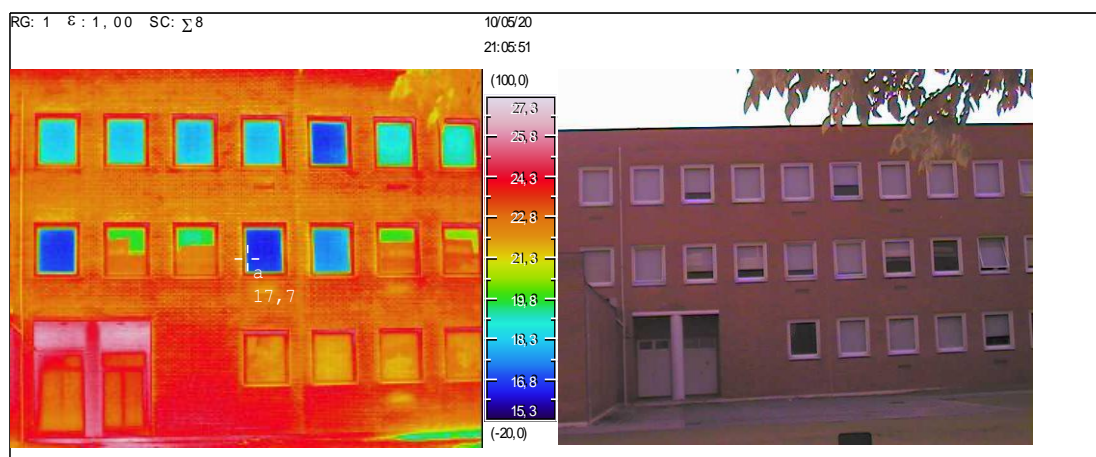


Figura 5.11 – Imagem térmica e visível (caso1)

Após a importação do ficheiro de temperaturas foram detectadas temperaturas negativas referentes à radiação reflectida nos vidros das janelas. Estas foram corrigidas e o resultado da imagem construída no programa é apresentado na Figura 5.12.

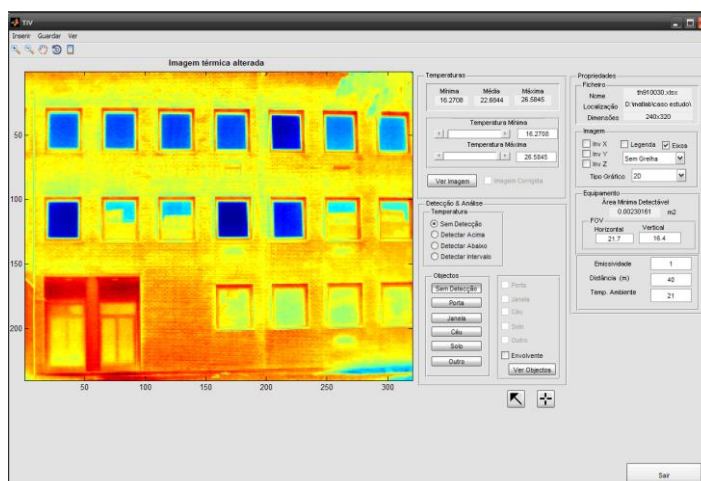


Figura 5.12 – Imagem térmica construída no programa TIV (caso 1)

O passo seguinte foi eliminar todos os objectos irrelevantes à análise da envolvente.

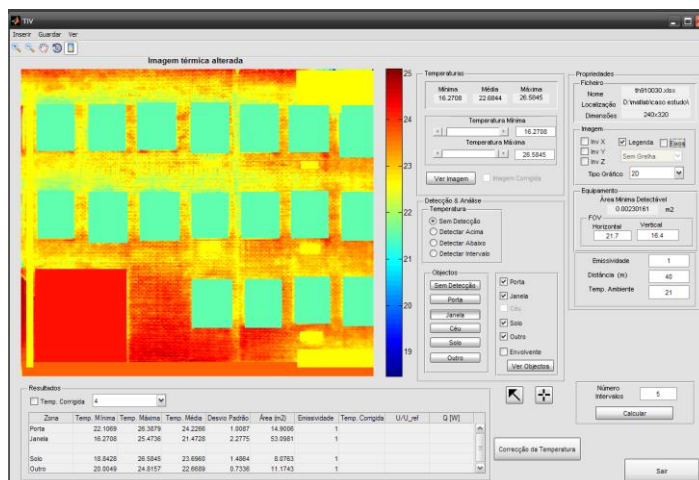


Figura 5.13 – Remoção de vários objectos (caso 1)

De seguida são apresentados os objectos que foram removidos da imagem térmica inicial.

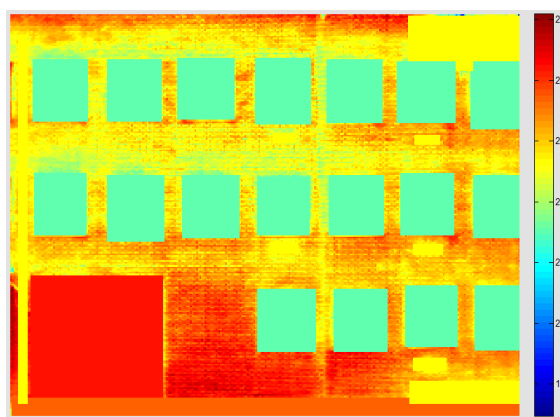


Figura 5.14 – Objectos removidos da imagem térmica (caso 1)

Os resultados da selecção anterior são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 5.3 – Resultados da selecção de vários objectos (caso 1)

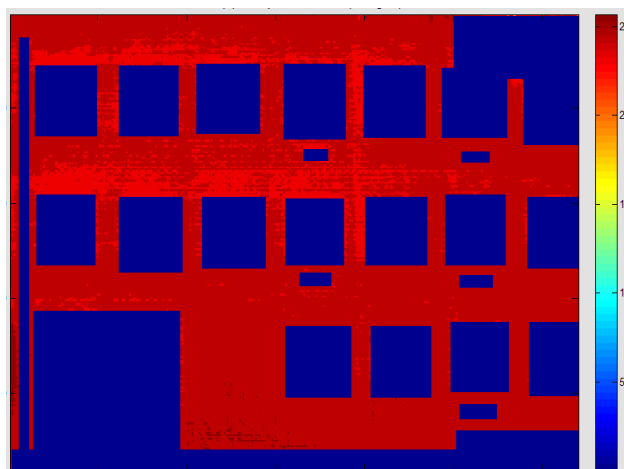
Zona	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Área (m ²)	ε
Porta	22.11	26.39	24.23	1.01	14.90	1
Janela	16.27	25.47	21.47	2.28	53.10	1
Solo	18.84	26.58	23.70	1.48	8.08	1
Outro	20.00	24.82	22.67	0.73	11.17	1

A análise da envolvente começou com a escolha do número de intervalos de temperatura, sendo definido pelo utilizador. Foram então definidos 5 intervalos de temperatura cujos valores são apresentados no Quadro 5.4:

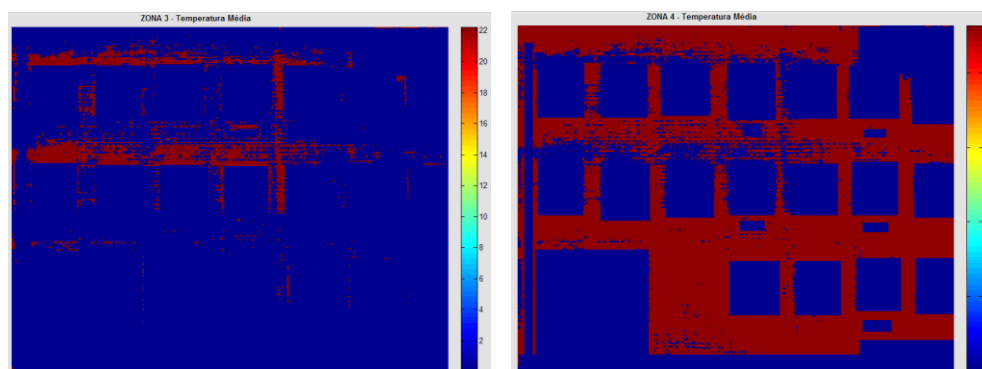
Quadro 5.4 – Intervalos de temperatura para a identificação das zonas (caso 1)

Intervalo	Limite inferior (°C)	Limite superior (°C)
1	16.3	18.3
2	18.3	20.4
3	20.4	22.5
4	22.5	24.5
5	24.5	26.6

Assim, de acordo com os intervalos acima definidos, com uma diferença de temperatura aproximadamente de 2°C foram definidas 5 zonas, cujo resultado é apresentado na Figura 5.15.

**Figura 5.15** – Zonas identificadas como envolvente (caso 1)

Na Figura 5.16 estão representadas as duas zonas com maior área, zonas 3 e 4:

**Figura 5.16** – Zonas com maior área, zonas 3 e 4 (caso 1)

Seguidamente, após a definição das zonas, foi realizada a correcção da temperatura, que neste caso foi escolhido o valor da emissividade de acordo com o material verificado em cada zona (0.85 - tijolo comum e a emissividade inicial para as restantes zonas cuja área é relativamente pequena), e foi processado o cálculo da relação de U . Na Figura 5.17, é então apresentada

graficamente a relação dos valores de U com o valor de referência escolhido. No presente caso foi seleccionada a zona 4 por ser a zona com a maior área.

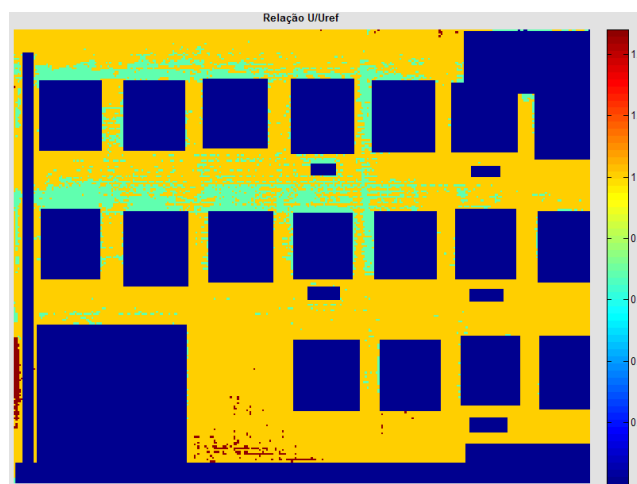


Figura 5.17 – Relação U/U_{ref} (caso 1)

O Quadro 5.5 reúne os resultados da análise efectuada para o caso 1:

Quadro 5.5 – Resultados da identificação das zonas (caso 1)

Zona	T Mínima (°C)	T Máxima (°C)	T Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Área (m ²)	ϵ	T Corrigida (°C)	U/U_{ref}	Q (W)
1	16.27	18.47	18.47	0	0.002	1	18.47	0	0
2	18.47	20.13	19.29	0.68	0,009	1	19.29	0	0
3	20.53	22.46	22.23	0.19	12.71	0.85	23.15	0.68	317.8
4	22.47	24.52	23.20	0.50	77.76	0.85	24.16	1.00	1944.4
5	24.53	25.09	24.66	0.11	0.71	0.85	25.68	1.48	17.8

Ao analisar os resultados pode-se concluir que, após a selecção e remoção dos objectos da imagem, as áreas correspondentes às zonas 1 e 2 são significativamente baixas quando comparadas para as restantes zonas, e deste modo não foi estabelecida qualquer relação com a relação de U para as restantes zonas. Relativamente as restantes relações de U , é possível verificar, que embora o valor da zona 5 seja claramente superior, este não deverá ser tido em consideração por representar uma área de pouca relevância, tal como comprova o valor do calor estimado Q .

5.2.2. Caso 2

O ficheiro de temperaturas aqui tratado diz respeito à imagem térmica recolhida pelo exterior do edifício de residências universitárias existente no campus da Universidade de Aveiro. Na Figura 5.18 é apresentada a respectiva imagem térmica conjuntamente com a imagem visível do caso aqui analisado.

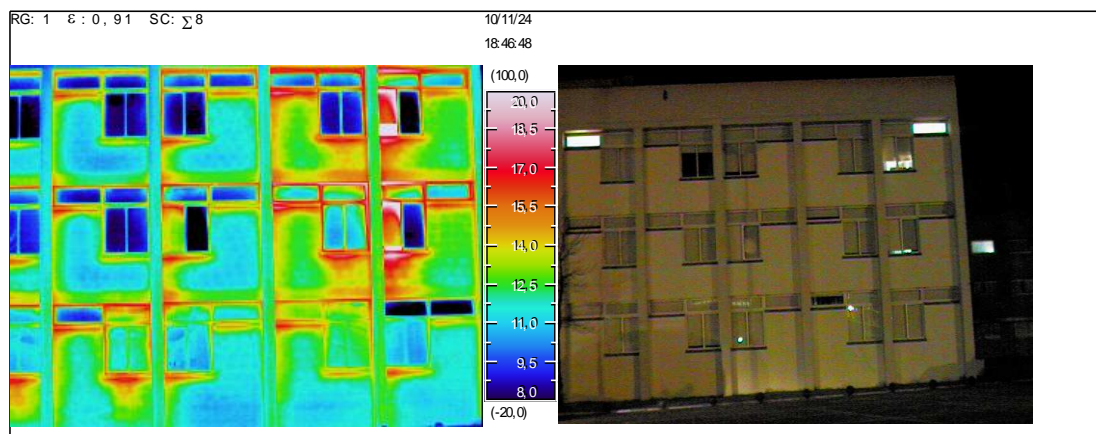


Figura 5.18 – Imagem térmica e visível (caso 2)

Após a importação do ficheiro de temperaturas foram detectadas temperaturas negativas referentes à radiação reflectida nos vidros das janelas. Estas foram corrigidas, sendo o resultado da imagem construída no programa apresentado na Figura 5.19.

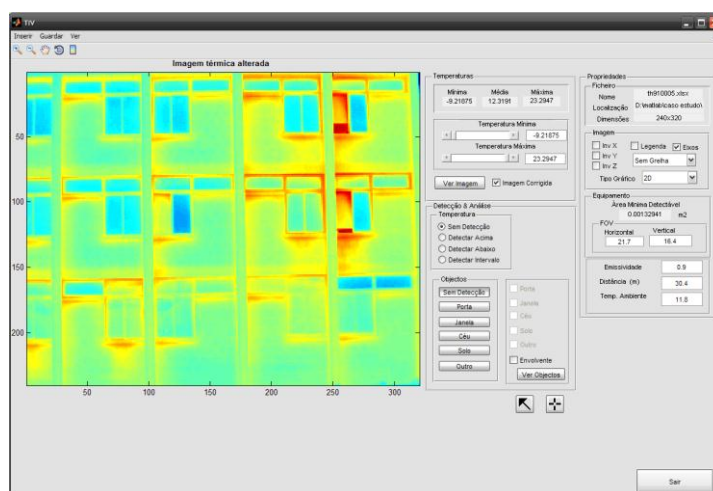


Figura 5.19 – Imagem térmica construída no programa TIV (caso 2)

O passo seguinte foi eliminar todos os vãos envidraçados para depois proceder à análise da envolvente. De seguida são apresentados os objectos que foram removidos da imagem térmica.

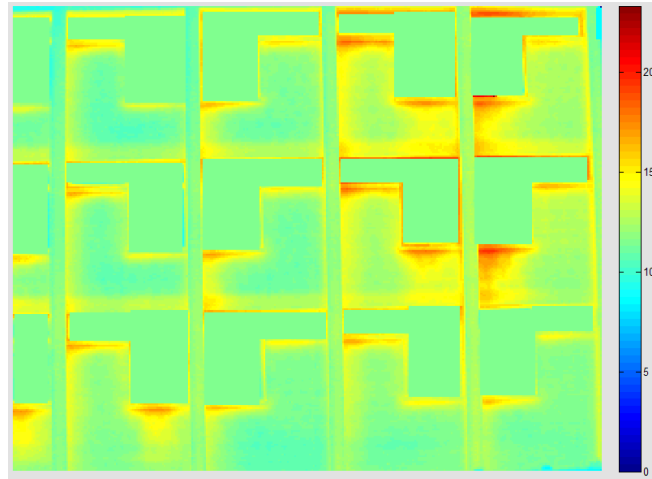


Figura 5.20 – Remoção dos vãos envidraçados (caso 2)

Os resultados da selecção anterior são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 5.6 – Resultados da selecção dos vãos envidraçados (caso 2)

Zona	T Mínima (°C)	T Máxima (°C)	T Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Área (m ²)	ε
Janela	6.19	22.87	11.61	2.62	31.65	1

A análise da envolvente começou com a escolha do número de intervalos de temperatura, de onde resultou a definição de 5 intervalos de temperatura, sendo este valor encontrado após várias operações de ajustamento. Os intervalos são apresentados no Quadro 5.7:

Quadro 5.7 – Intervalos de temperatura para a identificação das zonas (caso 2)

Intervalo	Limite inferior (°C)	Limite superior (°C)
1	0	4.66
2	4.66	9.32
3	9.32	13.97
4	13.97	18.64
5	18.64	23.29

Assim, de acordo com os intervalos acima definidos, a diferença de temperatura entre cada zona é de aproximadamente 5 °C. O resultado, das 5 zonas definidas é apresentado na Figura 5.21.

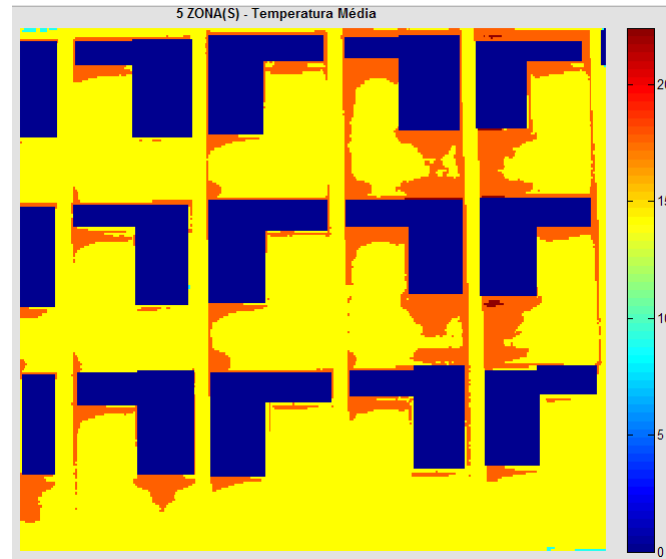


Figura 5.21 – Zonas identificadas como envolvente (caso 2)

Na Figura 5.22 estão representadas as duas zonas com maior área, zonas 3 e 4, definidas após a correcção da temperatura, cujo valor da emissividade foi definido de acordo com o material verificado em cada zona (0.54 – Betão / Alvenaria e a emissividade inicial para as restantes zonas cuja área é relativamente pequena):

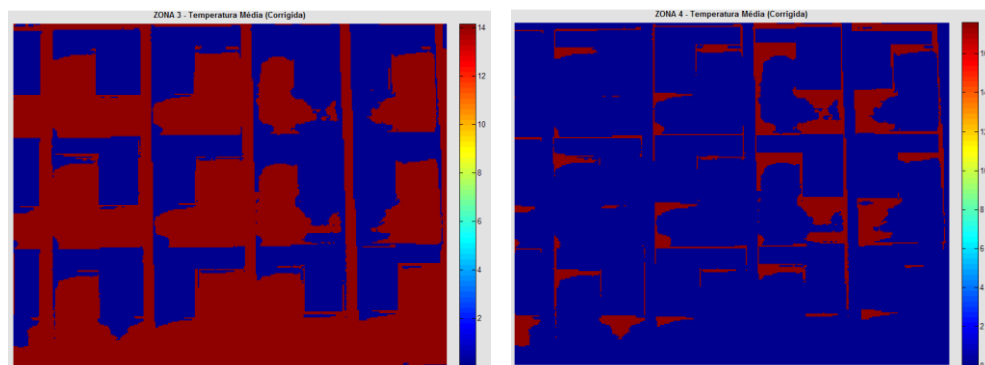


Figura 5.22 – Zonas com maior área, zonas 3 e 4 (caso 2)

Seguidamente, após a definição das zonas, foi realizado o cálculo da relação de U . Na Figura 5.23, é então apresentada graficamente a relação dos valores de U com o valor de referência escolhido. No presente caso foi seleccionada a zona 3 por ser a zona com a maior área.

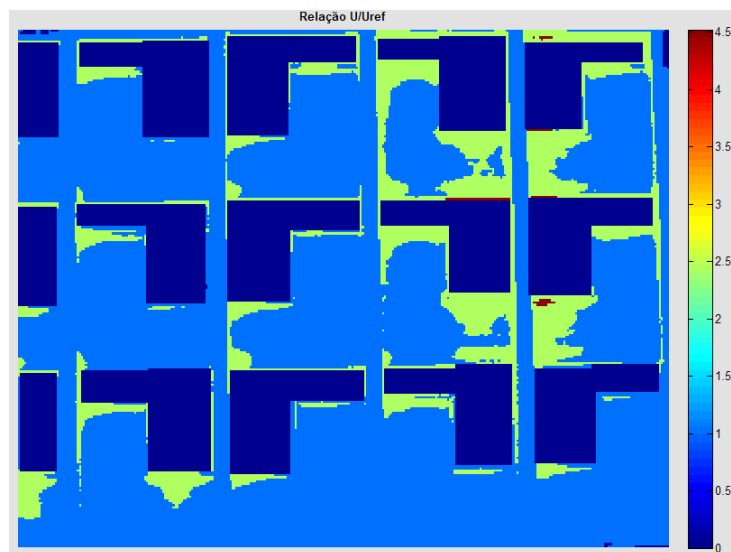


Figura 5.23 – Relação U/U_{ref} (caso 2)

O Quadro 5.8 reúne os resultados da análise efectuada para o caso 2:

Quadro 5.8 – Resultados da identificação das zonas (caso 2)

Zona	T Mínima (°C)	T Máxima (°C)	T Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Área (m ²)	ϵ	T Corrigida (°C)	U/U_{ref}	Q (W)
1	18.47	18.47	18.47	0	0.001	0.90	18.96	0	0
2	8.31	9.32	9.03	0.30	0.072	0.90	9.27	0	0
3	9.32	13.97	12.13	0.86	58.17	0.54	14.15	1.00	1454.2
4	13.98	18.63	15.08	0.95	12.03	0.54	17.59	2.46	300.7
5	18.64	23.29	19.23	0.69	0.12	0.54	22.43	4.52	2.9

Ao analisar os resultados pode-se concluir que para a zona 1 não foi encontrado nenhum ponto na imagem, e as áreas correspondentes às zonas 1 e 2 são significativamente baixas quando comparadas para as restantes zonas, que não foi estabelecida qualquer relação as restantes zonas. Relativamente às restantes zonas, é possível verificar, tal como no caso anterior, o valor da zona 5 é claramente superior e não deverá ser tido em consideração por representar uma área de pouca relevância, tal como comprova o valor do calor estimado Q .

Assim, conclui-se que é possível obter uma estimativa da relação global entre as várias zonas através de uma simples análise ao valor do calor estimado, sendo ainda possível definir as zonas onde realmente a variação do coeficiente de transmissão térmica deve ser estudada com maior detalhe.

6. Conclusão e trabalhos futuros

6.1. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se desenvolver diferentes técnicas de análise de imagens termográficas de envoltentes de edifícios, tentando deste modo dar a conhecer as potencialidades desta técnica emergente quando aplicada à caracterização do comportamento térmico da envolvente com recurso à termografia por infravermelhos passiva e a subsequente análise de padrões de distribuição de temperatura superficial. Assim, das diferentes opções apresentadas podemos concluir que esta temática, embora com muitos trabalhos experimentais, ainda tem muito por explorar, especialmente na vertente passiva aplicada ao estudo da envolvente opaca de edifícios. Deste modo, o presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento desta última vertente.

Tendo em conta que 40% das perdas pela envolvente de edifícios ocorrem através de paredes e janelas, o desenvolvimento de uma metodologia que seja capaz de as identificar e até quantificar, permite perspectivar oportunidades de melhoria e sugerir soluções. Este trabalho passou por estudar de que modo a termografia poderia contribuir para a caracterização térmica da envolvente, mas devido à complexidade existente na análise dos resultados obtidos a sua aplicação foi sempre limitada. Assim, interpretou-se esta limitação como uma oportunidade para desenvolver ainda mais o trabalho aqui preconizado, de forma a desenvolver no futuro uma aplicação capaz de proceder à análise e diagnóstico completo de imagens térmicas.

Duas abordagens foram desenvolvidas especificamente no âmbito deste trabalho.

Na primeira, a abordagem à imagem digital, é realizada a análise da imagem térmica através de diversas técnicas de processamento de imagem, onde se procede à detecção de zonas através das diferenças de cor existentes. O módulo desenvolvido processa imagens térmicas proveniente de qualquer tipo de equipamento de termografia, com ou sem o ficheiro de temperaturas, e analisa-a como uma imagem digital a cores. De acordo com o caso de estudo, os resultados obtidos são condicionados pela necessidade de converter a imagem a cores para a escala de cinzentos, mesmo tendo em conta a diminuição do número de cores através da técnica de realce aqui desenvolvida. Como a identificação das zonas é feita automaticamente através da segmentação da imagem binária, reconhece-se a limitação da aplicação pois, por vezes, exclui zonas que são facilmente identificadas visualmente pelo utilizador. Aqui, verificou-se que o espaço *RGB* é limitado para as técnicas de segmentação aplicadas, pelo que o próximo passo deverá ser o de adaptar a aplicação abordando o espaço *HSV*. Assim, conclui-se que a qualidade dos dados depende sempre da interacção do utilizador com código aberto em ambiente *Matlab*[®], que embora simples, requer a existência de conhecimentos de programação para obter assim a melhor conversão da imagem.

Na segunda abordagem, a abordagem à matriz de temperaturas, apenas é analisada a matriz de temperatura superficial de modo a encontrar as diversas zonas e respectivas propriedades. O módulo consiste na construção e análise da imagem térmica através da manipulação da matriz de

temperatura através de ferramentas gráficas tornando a interacção utilizador - aplicação simples e prática, cumprindo assim, o objectivo de ser utilizada por utilizadores menos experientes com a possibilidade de interpretar os resultados obtidos tanto visualmente como em forma tabelar. De acordo com o caso de estudo, a remoção dos objectos da restante envolvente contribuiu para uma melhor identificação das zonas. Relativamente à análise da envolvente, o número de zonas a analisar é definido pelo utilizador com base no número de intervalos de temperatura. Desta forma, a análise tem de ser efectuada diversas vezes até ser atingido um número de intervalos capaz de reflectir a realidade da imagem térmica. Este procedimento limita a aplicação desenvolvida, carecendo de uma revisão com vista a otimizar esta ferramenta.

No que diz respeito ao cálculo da relação de U , os valores encontrados apresentam uma distribuição idêntica à das temperaturas médias encontradas em cada zona. Na análise dos resultados, verificou-se que o cálculo da relação de U está dependente do valor da temperatura ambiente, pois em situações onde a temperatura da superfície é menor que temperatura ambiente, resulta numa relação de U de valor negativo. Ainda assim, é possível obter uma estimativa da relação global entre as várias zonas. Já o calor estimado vem ajudar a definir quais as zonas que realmente têm interesse de ser estudadas com maior detalhe.

Em suma, a aplicação de técnicas de análise de detecção automática de imagens térmicas provenientes da termografia por infravermelhos, com especial destaque na vertente passiva, apresentam-se como uma mais-valia na caracterização da envolvente opaca de edifícios, e um grande potencial na determinação do coeficiente de transmissão de calor da envolvente de edifícios existentes.

6.2. Trabalhos futuros

Provavelmente, o trabalho mais importante a realizar no futuro será a interligação dos módulos de tratamento e análise da imagem com o módulo das temperaturas de modo a desenvolver procedimentos automáticos para detecção de padrões de temperatura, e finalmente, enquadrá-los numa aplicação executável e independente do ambiente do programa *Matlab*®.

Embora, os resultados alcançados na abordagem da imagem digital a cores tenham sido satisfatórios, seria desejável que futuramente, a aplicação fosse desenvolvida no espaço *HSV*, em detrimento do espaço *RGB*, pois verificou-se ser o mais indicado para a segmentação da imagem.

Numa perspectiva de abordar as imagens térmicas digitais sem a existência da matriz das temperaturas correspondentes, mas onde se conhece as temperaturas mínima e máxima registadas, propõe-se o desenvolvimento da abordagem para a construção da matriz das temperaturas com base na imagem digital e na equação (4.12). Deste modo, a análise desenvolvida poderá abranger um variado leque de imagens térmicas provenientes de diversos equipamentos aumentando assim o campo de actuação da aplicação.

Apesar de, com o método desenvolvido, ser possível obter uma estimativa da área do pixel e, consequentemente, a área real dos elementos captados, deverão ser realizados outros estudos para que o erro associado ao cálculo da área do pixel seja contabilizado quando a

perpendicularidade entre o eixo horizontal da lente e a superfície em estudo não possa ser garantida, como por exemplo, imagens de edifícios altos ou espaço para montagem do equipamento limitado.

Poderá ser explorada a combinação da metodologia desenvolvida neste trabalho para o mapeamento do coeficiente de transmissão de calor com a aplicação de um método não invasivo de determinação do U , como por exemplo, o método do fluxímetro aplicado na zona escolhida como referência. Outro método alternativo passa por cobrir, ou substituir, uma janela ou outro elemento da envolvente por um painel de material cujo valor de U e da emissividade seja conhecido (e.g., placa de EPS revestida por tinta preta). Desta forma, toda a envolvente poderá ser referenciada relativamente à zona do painel.

Por outro lado, sugere-se o estudo termográfico de várias soluções construtivas existentes no mercado e cujos parâmetros sejam conhecidos, para validação do método matemático para a determinação da resistência térmica da envolvente de edifícios desenvolvido por Branco [2008].

Tendo em conta que 40% da energia térmica é perdida pelas coberturas (Figura 3.4), e que provavelmente, é onde as correcções são fisicamente mais simples de realizar, a metodologia desenvolvida neste trabalho aplicada a imagens térmicas provenientes deste campo deverá ser tida em conta em considerações futuras.

Referências bibliográficas

ABDEL-QADER, I. [et al.] - Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 41, n.º 5 (2008), p. 395-405.

ADENE- Perguntas e Respostas sobre a Certificação Energética de Edifícios no âmbito do RCCTE 2010.

AL-KASSIR, A. R. [et al.] - Thermographic study of energetic installations. Applied Thermal Engineering. ISSN 1359-4311. Vol. 25, n.º 2/3 (2005), p. 8p.

BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A. A. - Infrared thermography for building diagnostics. Energy and Buildings. ISSN 0378-7788. Vol. 34, n.º 2 (2002), p. 171-183.

BARREIRA, E. S. B. M. - Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Porto: FEUP, 2004. 196 f. Tese de Mestrado.

BARREIRA, E. S. B. M.; FREITAS, V. M. A. P. D. - Evaluation of building materials using infrared thermography: Construction and Building Materials. 2007. ISBN ISSN 0950-0618.

BINDA, L.; SAISI, A.- Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures: 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, 2009. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/1005.pdf>>.

BRANCO, J. M. P. D. - Estimativa experimental do coeficiente global de condução de calor em edifícios. Aveiro: [s.n.], 2008.

CANDORÉ, J. C. [et al.]- Helps with the thermal diagnosis of the building : Detection of defects of insulation by stimulated infra-red thermography: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.

CLARK, M. R.; MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. - Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 36, n.º 4 (2003), p. 265-275.

DATCU, S. [et al.] - Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 46, n.º 6 (2005), p. 451-467.

DEANS, J.; GERHARD, J.; CARTER, L. J. - Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 48, n.º 3 (2006), p. 202-216.

DIAKIDES, N. A.; BRONZINO, J. D. - Medical infrared imaging. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 9780849390272 (hardcover alk. paper)
0849390273 (hardcover alk. paper).

DINIS, B. - Termografia aplicada à física das construções. Porto: Universidade Fernando Pessoa, 2009. Dissertação de Licenciatura.

DOE, J.; BOETTCHER, E.; MILLER, B. - Identification of ground targets from airborne platforms. In: HOLST, G. C. - Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX. Proceedings of SPIE Vol. 7300. SPIE, Orlando, USA, 2009. ISBN 9780819475664, p. 73000I-8.

DU BOSQ, T. W.; FANNING, J. D. - Limitations of contrast enhancement for infrared target identification. In: HOLST, G. C. - Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX. Proceedings of SPIE Vol. 7300. SPIE, Orlando, FL, USA, 2009. ISBN 9780819475664, p. 73000G-8.

DUFOUR, M. B.; DEROME, D.; ZMEUREANU, R. - Analysis of thermograms for the estimation of dimensions of cracks in building envelope. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 52, n.º 2-3 (2009), p. 70-78.

ELECTROPHYSICS RESOURCE CENTER- Secrets to a successful thermal imaging-based building energy audit. Sofradir EC, Inc, 2009.

FLIR SYSTEMS - [em linha]. Disponível em: <http://www.flir.com/> [Consultado a 22/10/2010]

FLIR SYSTEMS - The ultimate infrared handbook for R&D professionals FLIR AB, 2010b.

FLUKE - [em linha]. Disponível em: www.fluke.pt/ [Consultado a 01/09/2010]

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. - Digital image processing. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, 2008. ISBN 9780131687288

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. - Digital image processing using MATLAB. Upper Saddle River (NJ) Pearson Education 2004. ISBN 0-13-008519-7

GRINZATO, E.; BISON, P. G.; MARINETTI, S. - Monitoring of ancient buildings by the thermal method. Journal of Cultural Heritage. ISSN 12962074. Vol. 3, n.º 1 (2002), p. 9p.

GRINZATO, E.; VAVILOV, V.; KAUPPINEN, T. - Quantitative infrared thermography in buildings. Energy and Buildings. ISSN 0378-7788. Vol. 29, n.º 1 (1998), p. 1-9.

HARALAMBOPOULOS, D. A.; PAPARSENOS, G. F. - Assessing the thermal insulation of old buildings - The need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. Energy Conversion and Management. ISSN 0196-8904. Vol. 39, n.º 1-2 (1998), p. 65-79.

HELLIER, C. J. - Handbook of nondestructive evaluation. McGraw-Hill Professional, 2003. ISBN 007139947X.

HUANG, Y. S.; WU, J. W. - Infrared thermal image segmentations employing the multilayer level set method for non-destructive evaluation of layered structures. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 43, n.º 1 (2010), p. 34-44.

IBARRA-CASTANEDO, C. [et al.] - Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials. In: CHEN, C. H. - Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization. World Scientific Publishing, 2007. ISBN 978-981-270-409-2, p. pp.325-348.

IBARRA-CASTANEDO, C. [et al.] - Infrared image processing and data analysis. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 46, n.º 1-2 (2004), p. 75-83.

INCROPERA, F. P. [et al.] - Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-471-45728-2.

IPAC - Infrared Processing and Analysis Center [em linha]. Disponível em: <http://www.ipac.caltech.edu/> [Consultado a 23/10/2009]

JAWORSKI, J.- The infrared thermography of buildings proceeding its surrounding and their thermal performance: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.

KALAMEES, T. - Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. Building and Environment. ISSN 0360-1323. Vol. 42, n.º 6 (2007), p. 2369-2377.

KISILEWICZ, T.; WRÓBEL, A.- Quantitative infrared wall inspection: 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Canada, 2010.

KLEIN, M. T. [et al.] - A straightforward graphical user interface for basic and advanced signal processing of thermographic infrared sequences. Thermosense Xxx. ISSN 0277-786X. Vol. 6939 (2008), p. U263-U271
220.

LI, Z. J. [et al.] - Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. Journal of Nondestructive Evaluation. ISSN 0195-9298. Vol. 19, n.º 1 (2000), p. 11-19.

LO, T. Y.; CHOI, K. T. W. - Building defects diagnosis by infrared thermography. Structural Survey. ISSN 0263080X. Vol. 22, n.º 5 (2004), p. 259-263.

MADDING, R.- Finding R-Values of Stud Frame Constructed Houses with IR Thermography: InfraMation. 2008.

MADRUGA, F. J. [et al.] - Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 38, n.º 5 (2005), p. 397-401.

MAIERHOFER, C.; ARNDT, R.; ROLLIG, M. - Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. Infrared Physics & Technology. ISSN 13504495. Vol. 49, n.º 3 (2007), p. 5p.

MAIERHOFER, C. [et al.] - Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. Cement & Concrete Composites. ISSN 0958-9465. Vol. 28, n.º 4 (2006), p. 393-401.

MAIERHOFER, C.; ROLLIG, M.- Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures: 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, 2009a.

MAIERHOFER, C. [et al.] - Influence of Surface Properties on the Detection and Quantification of Voids in Concrete Structures Using Active Thermography. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vols 28a and 28b. ISSN 0094-243X. Vol. 1096 (2009b), p. 1505-1511 2030.

MAIERHOFER, C. [et al.] - Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 46, n.º 1-2 (2004), p. 173-180.

MALDAGUE, X. - Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation. In: RASTOGI, P. K. ; INAUDI, D. - Trends in optical non-destructive testing and inspection. Elsevier, Amsterdam ; New York, 2000. ISBN 0080430201 (hc alk. paper), p. pp. 591-609.

MATHWORKS - MATLAB Documentation [em linha]. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/>. [Consultado a 22/06/2010]

MEDICAL INFRARED - [em linha]. Disponível em: <http://medicalir.com/> [Consultado a 19/10/2009]

MEOLA, C. - Infrared thermography of masonry structures. Infrared Physics & Technology. ISSN 13504495. Vol. 49, n.º 3 (2007a), p. 6p.

MEOLA, C. - A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. Materials Letters. ISSN 0167-577X. Vol. 61, n.º 3 (2007b), p. 747-750.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M.; GIORLEO, L. - The use of infrared thermography for materials characterization. Journal of Materials Processing Technology. ISSN 0924-0136. Vol. 155-156 (2004), p. 1132-1137.

MINKINA, W.; DUDZIK, S. - Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-74718-6 (Hbk).

MINKINA, W.; DUDZIK, S.; GRYŚ, S.- Errors of thermographic measurements – exercises: 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Québec (Canada), 2010.

MIX, P. E. - Introduction to nondestructive testing : a training guide. 2nd. Hoboken, N.J.: Wiley, 2005. ISBN 0471420298 (cloth).

NEC SAN-EI - Report Generator (TH91-713) User's Manual. 2005a.

NEC SAN-EI - Viewer Program (TH91-719) User's Manual. 2005b.

NEC/AVIO - Nec Avio Infrared Technologies Co.,Ltd [em linha]. Disponível em: <http://www.nec-avio.co.jp/en/index.html> [Consultado a 26/10/2009]

OCAÑA, S. M.; GUERRERO, I. C.; REQUENA, I. G. - Thermographic survey of two rural buildings in Spain. Energy and Buildings. ISSN 0378-7788. Vol. 36, n.º 6 (2004), p. 515-523.

OMAR, M. [et al.] - Infrared seed inspection system (IRSIS) on painted car shells. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 48, n.º 3 (2006), p. 240-248.

PINA SANTOS, C.; MATIAS, L. - Application of thermography for moisture detection: A laboratory research study. Xxx lahs World Congress on Housing, Housing Construction: An Interdisciplinary Task, Vols 1-3. (2002), p. 1501-1506.

PIRES, L. C. C. - Estudo experimental da convecção natural em superfícies verticais com recurso à termografia por infravermelhos. Covilhã: Univ. da Beira Interior, 2002. 83 f. Tese de Mestrado.

RCCTE- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios: Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril. Lisboa, 2006.

RIBEIRO, P. J. A. - Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação com Recurso a Um Termofluxímetro. 2009.

ROGALSKI, A. - Infrared detectors: status and trends. Progress in Quantum Electronics. ISSN 0079-6727. Vol. 27, n.º 2-3 (2003), p. 59-210.

ROSA SANTOS, C. - Termografia: Um diagnóstico de recurso ou um recurso do diagnóstico [em linha]. Disponível em: <http://www.equisport.pt/> [Consultado a 22/10/2009]

SAKAGAMI, T.; KUBO, S. - Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography. Infrared Physics & Technology. ISSN 1350-4495. Vol. 43, n.º 3-5 (2002), p. 311-316.

SALES, R. B. C. [et al.]- Thermal Analysis of Structural Masonry in Concrete Block Containing Expanded Polystyrene (EPS) Using Digital Infrared Thermal Image: 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Canada, 2010.

SCHAEFER, A. L. [et al.] - The use of infrared thermography as an early indicator of bovine respiratory disease complex in calves. Research in Veterinary Science. ISSN 0034-5288. Vol. 83, n.º 3 (2007), p. 376-384.

SILVA, R. - Estudo da termografia por infravermelho: Aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Tese de Mestrado.

SUONKETO, J.; KORPI, M.; AALTONEN, A.- Detecting points of unintentional ventilation: 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, 2009.

TAVUKCUOGLU, A. [et al.] - Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Agzikarahan (Aksaray), Turkey. NDT & E International. ISSN 09638695. Vol. 38, n.º 5 (2005), p. 9p.

TAVUKCUOGLU, A. [et al.] - The assessment of a roof drainage system for an historical building. Building and Environment. ISSN 0360-1323. Vol. 42, n.º 7 (2007), p. 2699-2709.

TITMAN, D. J. - Applications of thermography in non-destructive testing of structures. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 34, n.º 2 (2001), p. 149-154.

UNIVERSITÉ LAVAL - [em linha]. Disponível em: <http://mivim.gel.ulaval.ca/>. [Consultado a 20/09/2010]

WALKER, B. H. - Optical engineering fundamentals: Tutorial texts in optical engineering ; v. TT 30. Bellingham, Wash., USA: SPIE Optical Engineering Press, 1998. ISBN 0819427640 (softcover).

WOERNER, T. [et al.]- Exterior building envelope inspections using thermal infrared imaging. Public Building Services of the General Services Administration, 2006.

WRÓBEL, A.; KISILEWICZ, T.- Detection of thermal bridges - aims, possibilities and conditions: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.

YOUCEF, M. H. A. L. [et al.]- Diagnostic of insulated building walls of old restored constructions using active infrared thermography: 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Canada, 2010.

YOUCEF, M. L. [et al.]- A non destructive method for diagnostic of insulated building walls using infrared thermography in real situation: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.

Anexo A

A. Valores de emissividade

Fonte: www.fluke.pt

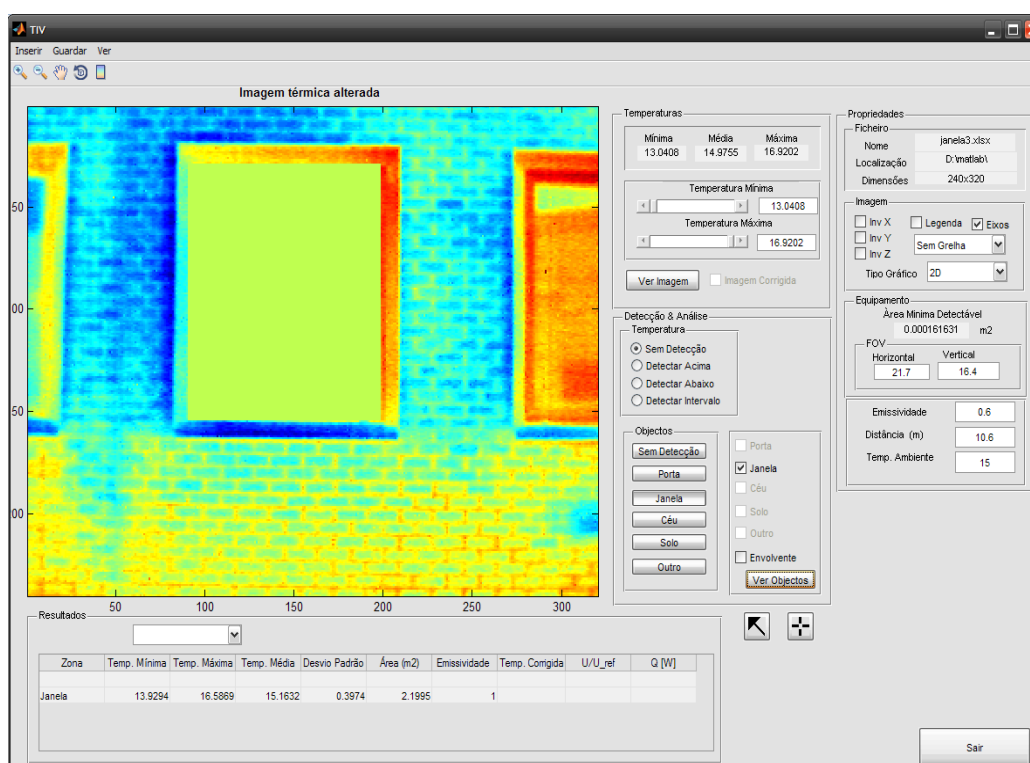
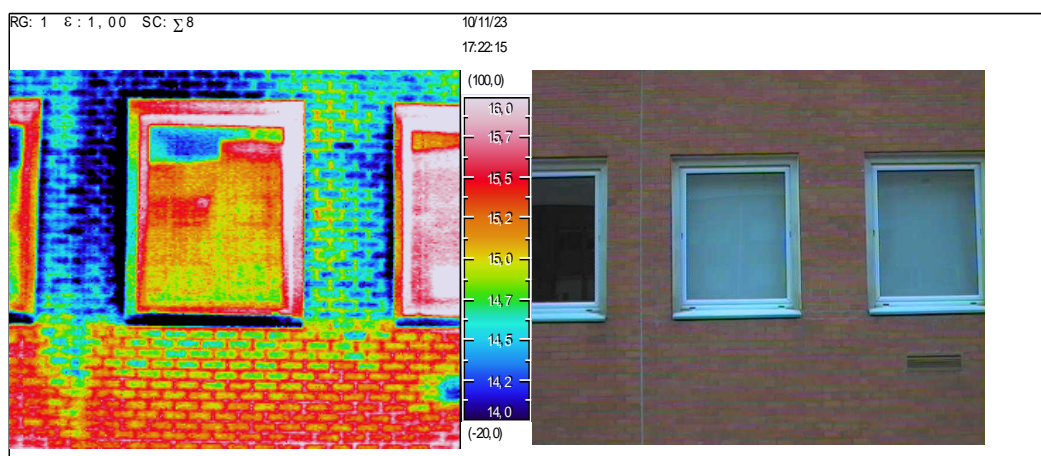
Material	Emissividade *	Material	Emissividade *
Alumínio, polido	0,05	Ferro, forjado, polido	0,28
Alumínio, superfície rugosa	0,07	Laca, baquelite	0,93
Alumínio, fortemente oxidado	0,25	Laca, preta, baça	0,97
Placa de amianto	0,96	Laca, preta, brilhante	0,87
Tecido de amianto	0,78	Laca, branca	0,87
Papel de amianto	0,94	Fuligem	0,96
Ardósia de amianto	0,96	Chumbo, cinzento	0,28
Latão, baço, embaciado	0,22	Chumbo, oxidado	0,63
Latão, polido	0,03	Chumbo, vermelho, em pó	0,93
Tijolo, comum	0,85	Chumbo, brilhante	0,08
Tijolo, acetinado, rugoso	0,85	Mercurio, puro	0,1
Tijolo, refractário, rugoso	0,94	Níquel, em ferro fundido	0,05
Bronze, poroso, rugoso	0,55	Níquel, puro polido	0,05
Bronze, polido	0,1	Tinta, acabamento em prata**	0,31
Carbono, purificado	0,8	Tinta, óleo, média	0,94
Ferro fundido, fundição rugosa	0,81	Papel, preto, brilhante	0,9
Ferro fundido, polido	0,21	Papel, preto, baço	0,94
Carvão, em pó	0,96	Papel, branco	0,9
Crómio, polido	0,1	Platina, pura, polida	0,08
Argila, à chama	0,91	Porcelana, vidrada	0,92
Betão	0,54	Quartzo	0,93
Cobre, polido	0,01	Borracha	0,93
Cobre, polido comercial	0,07	Goma-laca, preta, baça	0,91
Cobre, oxidado	0,65	Goma-laca, preta, brilhante	0,82
Cobre, oxidado a preto	0,88	Neve	0,8
Fita isoladora, plástico preto	0,95	Aço, galvanizado	0,28
Esmalte **	0,9	Aço, fortemente oxidado	0,88
Fórmica	0,93	Aço, laminado a frio	0,24
Solo gelado	0,93	Aço, superfície rugosa	0,96
Vidro	0,92	Aço, vermelho enferrujado	0,69
Vidro, gelado	0,96	Aço, placa, com revestimento de níquel	0,11
Ouro, polido	0,02	Aço, placa, laminado	0,56
Gelo	0,97	Estanho, polido	0,05
Ferro, laminado a quente	0,77	Tungsténio	0,05
Ferro, oxidado	0,74	Água	0,98
Ferro, chapa galvanizada, polido	0,23	Zinco, placa	0,2
Ferro, chapa, galvanizado, oxidado	0,28	Ferro, forjado, polido	0,28

*Emissividades de quase todos os materiais são medidas a 0 °C mas não diferem muito à temperatura ambiente.

**Tinta, acabamento em prata é medida a 25 °C e Tinta, esmalte a 27 °C.

Anexo B

B. Ensaio experimental para verificação da área do pixel



Dados e resultados obtidos

Área real do vidro sem caixilharia 1.40x1.60	2.24 m ²
Distância da lente à superfície	10.6 m
Área obtida pela aplicação TIV	2.1995 m ²

SInBAD

Estes anexos só estão disponíveis para consulta através do CD-ROM.
Queira por favor dirigir-se ao balcão de atendimento da Biblioteca.

Serviços de Documentação
Universidade de Aveiro